

*ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y
DE TELECOMUNICACIÓN. SANTANDER*

**ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE LA IMPLANTACIÓN
DE UNA BIOCUBIERTA ACTIVA EN EL VERTEDERO DE
PROVIDENCE, SEYCHELLES.**

**TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE
IMPLEMENTATION OF AN ACTIVE BIOCOVER IN
PROVIDENCE'S LANDFILL, SEYCHELLES**

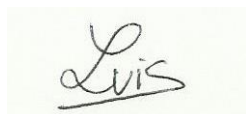
TRABAJO FIN DE MÁSTER (TFM)

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA QUÍMICA POR LA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Y LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS
VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA**

Alumno: Luis Sierra Laso

Fecha: 25 de enero de 2021

Firma



Director: Jorge Cristóbal García

Curso Académico: 2020-2021

ÍNDICE

1. Planteamiento.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Protocolo de Kyoto y Mecanismo del Desarrollo Limpio.	5
1.2. Antecedentes.....	8
1.2.1. Cubierta oxidante de metano.	12
2. Objetivos.....	14
3. Metodología.	15
3.1. Análisis técnico.....	15
3.2. Análisis económico.	22
3.2.1. Costes de inversión.	22
3.2.2. Costes operacionales.	23
3.2.3. Beneficios.	28
3.2.4. Indicadores de rentabilidad.....	29
3.3. Análisis de sensibilidad.	29
4. Resultados.	31
4.1. Análisis de sensibilidad.	36
5. Conclusiones.	39
6. Trabajo futuro.....	41
7. Nomenclatura.	42
8. Bibliografía.	47

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Contribución del turismo al PIB (Producto Interior Bruto) en Seychelles a precios de mercado actuales.	2
Figura 2. Distribución másica de residuos por tipo en los SIDS.	2
Figura 3. Diferencia entre el consumo de alimentos en países de la OCDE y en los SIDS	3
Figura 4. Emisiones antropogénicas de metano por fuente	4
Figura 5. Incremento de la temperatura global del planeta entre 1880 y 2020, por distintas fuentes.....	5
Figura 6. Distribución geográfica de los CDM.....	8
Figura 7. Localización de Seychelles	9
Figura 8. Disposición de las unidades del vertedero	10
Figura 9. Esquema básico de una cubierta oxidante de metano.	13
Figura 10. Diagrama donde se observan los parámetros calculados para el análisis técnico.	16
Figura 11. Emisiones evitadas en PL1 con compost importado.	31
Figura 12. Emisiones evitadas en PL2 con compost importado.	31
Figura 13. Emisiones evitadas en PL1 con compost obtenido en la propia isla.	32
Figura 14. Emisiones evitadas en PL2 con compost obtenido en la propia isla.	32
Figura 15. Análisis de sensibilidad de los costes capitales para PL1.....	36
Figura 16. Análisis de sensibilidad de los costes capitales para PL2.....	37
Figura 17. Análisis de sensibilidad del factor de oxidación de la cubierta para PL1.	37
Figura 18. Análisis de sensibilidad del factor de oxidación de la cubierta para PL2.	38

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Flujo anual de residuos en el vertedero y proyecciones futuras.....	11
Tabla 2. Composición másica por tipo de residuo del PL2 en 2016 y 2017.	12
Tabla 3. Fracción de carbono orgánico degradable en masa en los residuos de tipo j. ...	18
Tabla 4. Tasa de descomposición para los residuos de tipo j.	18
Tabla 5. Resultados del análisis económico en miles de euros.....	34

1. PLANTEAMIENTO.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (SIDS, por sus siglas en inglés *Small Island Development States*), son, como bien dice su nombre, estados constituidos por pequeñas islas con una capacidad económica reducida. De acuerdo con las Naciones Unidas, hay reconocidos 58 SIDS, que se dividen en 3 grupos, los SIDS del Caribe, como Bahamas, Cuba o Jamaica, los SIDS del Pacífico y Atlántico, como Nueva Caledonia, Papúa Nueva Guinea o Polinesia Francesa, y los SIDS del Índico, Mediterráneo y sur de China (AIMS), como Cabo Verde, Seychelles o Guinea-Bissau (Naciones Unidas, 2018). Las características más destacadas de estos estados se pueden dividir en las siguientes categorías (Wong, 2011):

- Medio ambiente: existe una gran sobreexplotación de recursos naturales, tienen espacio limitado para realizar actividades de gestión de residuos y una baja calidad del agua. Además, son más vulnerables ante el cambio climático, ya que son muy susceptibles a desastres naturales. También tienen problemas con residuos procedentes de bienes importados, debidos en gran parte al turismo.
- Sociales: tienen problemas con el incremento de los impactos sobre la salud debidos al agua no potable y a la mala sanidad. Además, tienen mayores índices de pobreza que otros países. Y, finalmente, respecto a la gestión de residuos, tienen falta de expertos para lidiar con los problemas debidos a los residuos.
- Económicos: existen oportunidades de desarrollo económico limitadas, ya que dependen del turismo, la minería, la agricultura y la pesca.

Estos países, debido a las características anteriormente mencionadas, son afectados en mayor medida por fenómenos como el cambio climático, la contaminación marina o el incremento de la generación de residuos.

Uno de los principales motores de la economía anteriormente mencionados, como se puede observar en la figura 1 para el caso de Seychelles, es a la vez una de las principales causas de los problemas ambientales – el turismo.

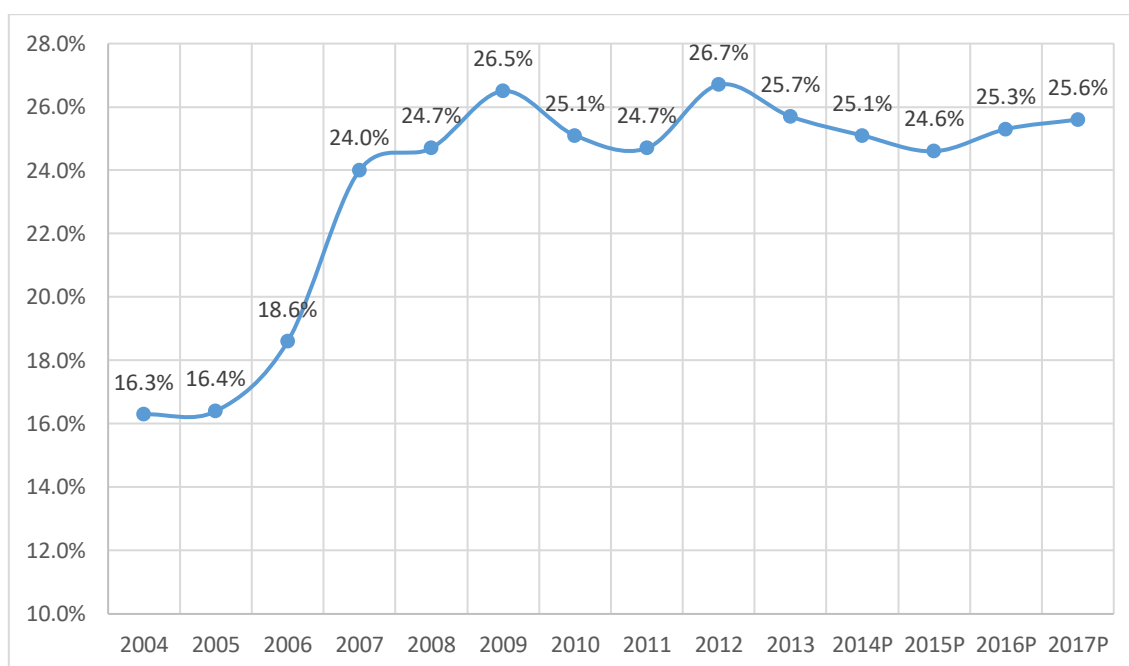


Figura 1. Contribución del turismo al PIB (Producto Interior Bruto) en Seychelles a precios de mercado actuales (Gobierno de Seychelles, 2018).

Esto genera que a pesar de que el producto interior bruto del país sea bajo en comparación a los países que conforman la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), los índices de generación de residuos por persona sean superiores. Esto es debido a que los residuos generados por los habitantes y los turistas, es dividido sólo entre la población residente en el país, generando esta diferencia respecto a los países de la OCDE (Nippon Koei, 2019).

En la figura 2A se muestran las principales fracciones másicas de residuos en los SIDS, mientras que en la figura 2B se muestran las fracciones de los países miembros de la OCDE (Mohee y cols., 2015).

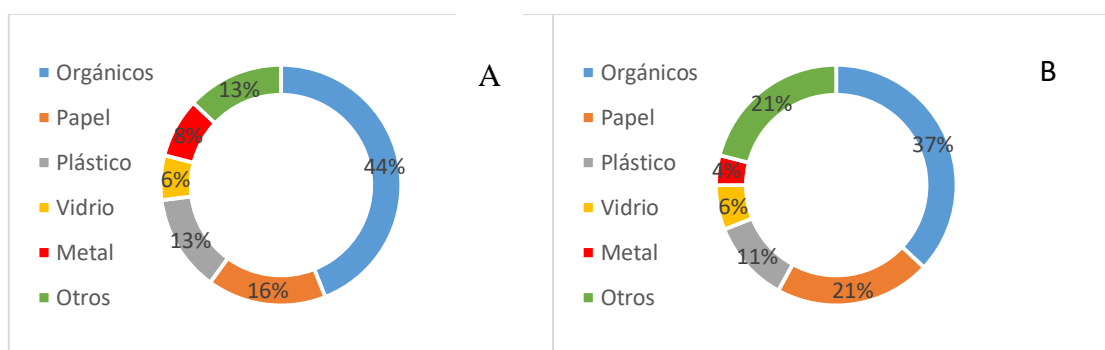


Figura 2. Distribución másica de residuos por tipo en los SIDS (Mohee y cols., 2015).

En esta distribución se observa que para los países de la OCDE destacan los reciclables (papel, plástico, vidrio y metales), frente a los orgánicos, a diferencia del caso de los SIDS, donde destaca la fracción orgánica. Esta diferencia es debida, principalmente, a que los países desarrollados tienen una forma de consumo muy distinta. Por ejemplo,

como se observa en la figura 3 en los países con menor capacidad económica, en este caso los SIDS, lo normal es consumir las frutas y verduras tal y como son cosechadas, a diferencia de los países desarrollados donde se consumen envasadas y ya preparadas (Mohee y cols., 2015).



Figura 3. Diferencia entre el consumo de alimentos en países de la OCDE y en los SIDS (Shutterstock, 2015) (Grain, 2019).

Uno de los grandes problemas que tienen estos estados es que la deposición de residuos en vertedero es la manera más barata de gestionarlos, ya que otras tecnologías como digestión anaerobia, que podría reducir el impacto de los residuos orgánicos, son normalmente dejadas de lado debido a su mayor coste. Esto, sumado a la pequeña capacidad económica para promover y gestionar el reciclado, es la causa de que muchos de estos estados tengan un porcentaje tan alto de residuos que son depositados en vertedero sin tratamiento previo. Esto genera una gran cantidad de residuos, que ocupa un espacio importante en estados que destacan por el pequeño espacio que tienen disponible.

Además, los vertederos no suelen ser gestionados como deberían una vez llegados a su máxima capacidad y tras su cierre. De hecho, estos vertederos suelen admitir más residuos de los previstos en su diseño, ocasionando, problemas como incendios, generación de emisiones de contaminantes que afectan a la salud de la población o contaminación del medio marino.

También es importante destacar que los vertederos son una gran fuente de metano (CH_4), un gas con un poder invernadero 28 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2) (Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos, s. f.), debido a la gran cantidad de materia orgánica que almacenan, entre un 41% y un 48% (Mohee y cols., 2015). Son tan importantes como fuente de CH_4 que se estima que representan entre un 11% y un 12% de las emisiones globales antropogénicas de CH_4 (Global Methane Initiative, 2010), como se puede observar en la figura 4.

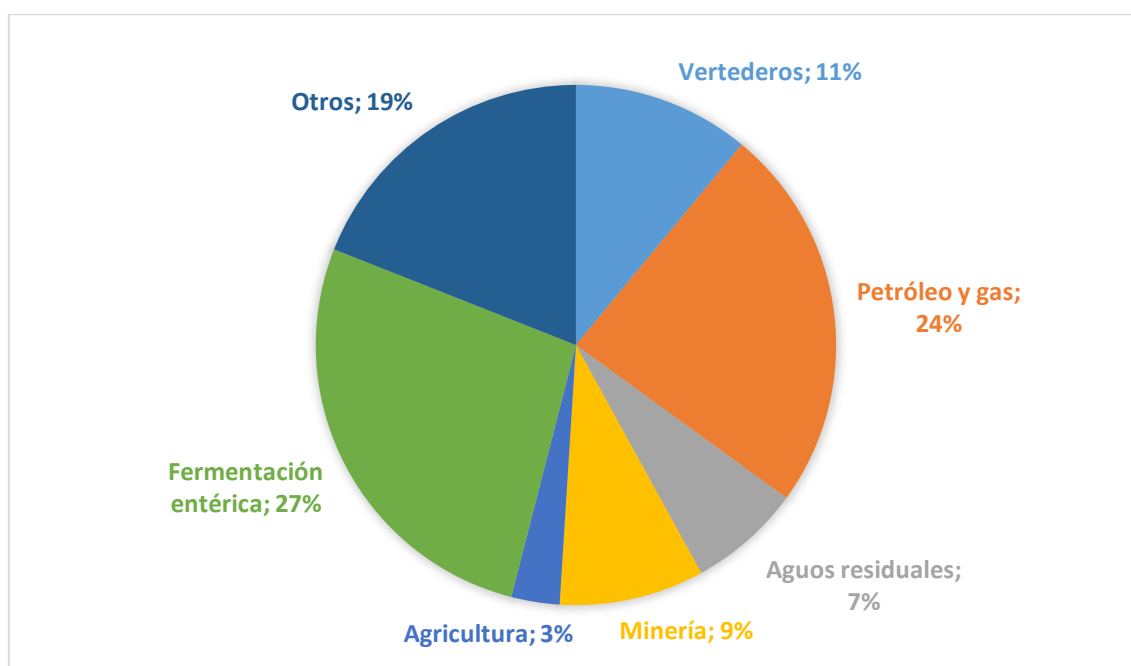


Figura 4. Emisiones antropogénicas de metano por fuente (Global Methane Initiative, 2010).

En la figura 4 se observa el gran peso que tienen las emisiones de CH_4 de los vertederos respecto al resto de fuentes. Lo que provoca este CH_4 emitido es un aumento de la temperatura del planeta debido a que tiene una mayor capacidad de absorber calor que el CO_2 . El aumento de la temperatura del planeta es un gran problema que existe actualmente (conocido como calentamiento global), ya que se están alcanzando niveles de temperatura nunca vistos como se observa en la figura 5. Estas altas temperaturas tienen muy diversas consecuencias que afectan al planeta de muy distintas formas, como pueden ser el aumento de las hambrunas, las sequías o los fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes o tsunamis. Estas consecuencias ya se están notando en zonas como los Polos, los cuales se están derritiendo, causando pérdida de la fauna que allí habita, además del aumento del nivel de los océanos y su acidificación. Otros problemas que se están dando actualmente son las sequías, que sobre todo afectan a África, causando hambrunas y muertes por falta de agua. Estas sequías, además, provocan un aumento de los incendios, que acaban con un gran número de flora y fauna. Asimismo se dan otros fenómenos como la “mancha” del Océano Pacífico (Dorantes-Gilardi y Rivas, 2019), una masa anómala de agua caliente que fomenta la proliferación de un alga tóxica que ha causado la muerte de un gran número de aves marinas.

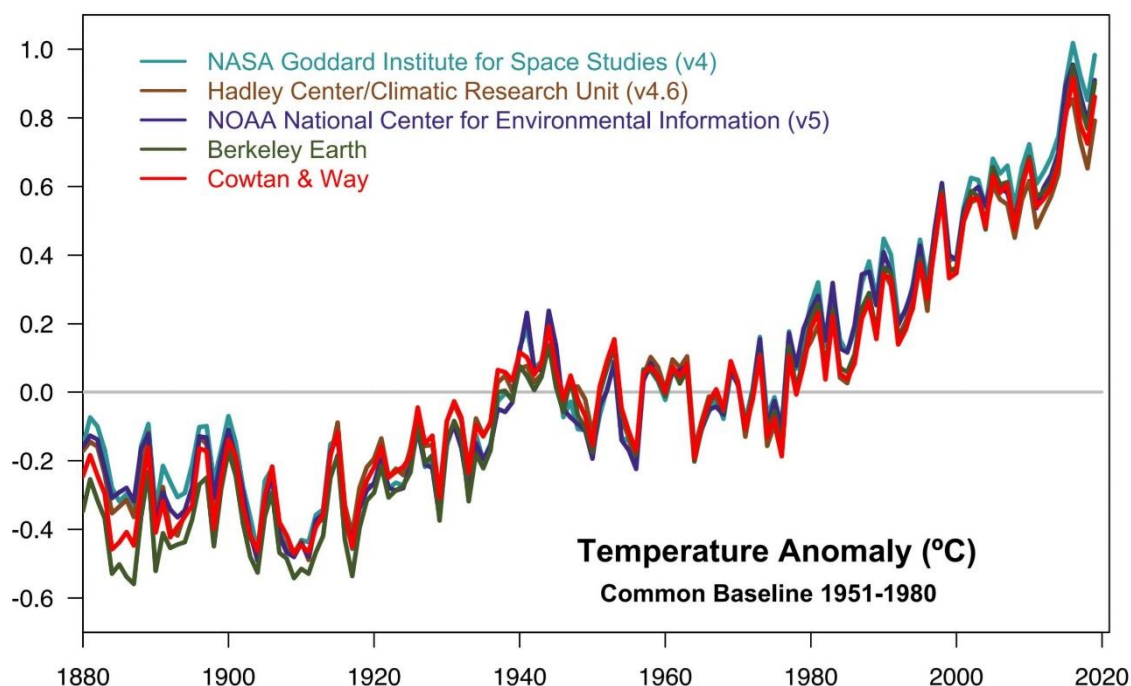


Figura 5. Incremento de la temperatura global del planeta entre 1880 y 2020, por distintas fuentes (NASA, 2020)

1.1.1. Protocolo de Kyoto y Mecanismo del Desarrollo Limpio.

El Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional, ratificado en 1997, cuyo objetivo es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son CO₂, CH₄, óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Gobierno de España, 2020). Este acuerdo diferencia entre países desarrollados y países en vías de desarrollo, siendo los primeros los mayores culpables del efecto invernadero debido a los 150 años de industrialización, ya que han generado la mayor parte de las emisiones antropogénicas emitidas a la atmósfera. Estos países, los desarrollados, se comprometieron a reducir, para el período comprendido entre 2008 y 2012, sus emisiones un 5% total respecto al año de referencia elegido, en este caso 1990. Es importante destacar que los objetivos de reducción eran diferentes de un país a otro.

Este acuerdo fue actualizado en la cumbre de 2012 en Doha, para el período comprendido entre 2013 y 2020 (Naciones Unidas, 2016). Además, el compromiso fue reforzado con el Acuerdo de París en 2015, donde se estableció el objetivo de evitar el aumento de la temperatura global hasta los 2°C, reduciendo los GEI emitidos.

El Protocolo de Kyoto establece tres mecanismos flexibles para reducir el coste de las acciones destinadas a reducir la emisión de GEI. Estos mecanismos son: Mecanismo del Desarrollo Limpio (MDL), aplicación conjunta (JI por las siglas en inglés *Joint Implementation*) y comercio internacional de emisiones. A continuación, se explican los mecanismos anteriormente mencionados:

- Comercio internacional de emisiones.

Permite que los países con exceso de créditos puedan venderlos a países que no han cumplido su objetivo de reducción de GEI, fomentando así los proyectos que reducen las emisiones de GEI y permitiendo flexibilidad a los países que no pueden llegar a cumplir sus objetivos por su propia acción.

- Aplicación conjunta.

Mecanismo a través del cual, un país del Anexo 1 puede recibir certificados de reducción de emisiones (CERs, por sus siglas en inglés *Certified Emission Reductions*, y equivalen a una tonelada de CO₂ equivalente) financiando proyectos que reduzcan las emisiones netas de GEI de otro país del Anexo 1.

- Mecanismo del Desarrollo Limpio (MDL).

Se trata de un mecanismo que permite a los países reducir sus emisiones, según el Protocolo de Kyoto, mediante la creación de proyectos en países en vías de desarrollo, que les aportan CERs. La idea de este mecanismo es la de reducir los costes que conlleva la reducción de emisiones, debido a que la misma acción en un país desarrollado tiene un mayor coste debido a que los sueldos y los precios son más altos.

Así mismo, este mecanismo genera una transferencia de tecnología y un desarrollo sostenible en el país en el que se produce la acción, que es un país en vías de desarrollo.

Es importante puntualizar que no todas las reducciones de emisiones conllevan la generación de CERs. Un proyecto debe demostrar la adicionalidad, es decir, debe demostrar que no es rentable sin este mecanismo. Por ejemplo, en el caso de las acciones relacionadas con la energía, si esa acción ya es rentable con la venta de la energía generada, queda fuera de la generación de CERs, dado que esto es una ayuda para las acciones que no puedan ser tomadas debido a los aspectos económicos del proyecto.

Los proyectos pueden elegir dos modalidades para obtener créditos, la primera estableciendo un tiempo fijo de 10 años y, la segunda, estableciendo un tiempo de 7 años prorrogable otros 7, pudiendo ser prorrogado una tercera vez hasta los 21 años.

Los proyectos deben seguir una metodología aprobada que de detalles técnicos y que determine de forma controlada la reducción de emisiones, además, de demostrar la adicionalidad del proyecto para poder generar CERs. Estas metodologías son distintas para cada categoría y tipo de actividad. En el caso de que la metodología no pueda ser aplicada debido a excepciones del proyecto, se puede desarrollar una nueva metodología, por lo que es un sistema flexible. Todas las metodologías son revisadas continuamente y pueden sufrir cambios, no obstante, si un proyecto se ha comenzado con una versión anterior de la metodología, puede continuar con ella.

Dentro de los proyectos del MDL, este tipo de proyectos se enmarcan dentro de los que el Protocolo de Kyoto define como a pequeña escala, debido a que reducen las emisiones un máximo de 60 Kilotoneladas de CO₂ equivalentes (ktCO₂eq.). Es importante esta característica, debido a que los proyectos a pequeña escala tienen que superar obstáculos importantes como son las tasas (Naciones Unidas, 2007).

A continuación, se enumeran los tipos y categorías de proyectos contemplados en el MDL para la pequeña escala, que da una idea de las categorías generales del MDL:

- Tipo 1. Proyectos de energías renovables.
 - Generación de energía para el usuario.
 - Impulsar la energía para el usuario.
 - Suministro de energía térmica.
 - Generación de energía para un sistema que incluye al menos una unidad de producción de combustión fósil.
- Tipo 2. Proyectos de mejora de la eficiencia energética.
 - Mejora de la eficiencia energética en el transporte y distribución.
 - Mejora de la eficiencia energética en la generación.
 - Programas de tecnologías específicas que mejoran la eficiencia energética en la demanda.
 - Eficiencia energética y cambio de combustible en plantas industriales.
 - Eficiencia energética y cambio de combustible en el sector de la construcción.
 - Eficiencia energética y cambio de combustible en instalaciones y actividades agrícolas.
- Tipo 3. Otros proyectos.
 - Agricultura.
 - Sustitución de combustible.
 - Reducción de emisiones en el sector del transporte.
 - Captura y anulación de metano.
 - Anulación del metano de la descomposición de biomasa mediante combustión controlada.

Dentro del marco del MDL, los proyectos llevados a cabo en vertederos son principalmente proyectos de captura de CH_4 (LFG, por sus siglas en inglés *Landfill Gas*). Este CH_4 puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica o, ser directamente quemado en una antorcha, reduciendo su impacto al ser convertido a CO_2 . Las acciones que se basan en convertir el CH_4 en CO_2 se basan en que el potencial impacto al efecto invernadero del CO_2 es significativamente menor. El problema es que estos sistemas requieren tanto de un flujo importante como una concentración de CH_4 alta, características que normalmente no se dan en los vertederos de los SIDS debido a su menor tamaño. Por ello, se han valorado la implantación de cubiertas oxidantes de CH_4 (MOL, por sus siglas en inglés *Methane Oxidation Layer*) (Scheutz y cols., 2014) (Naciones Unidas, 2011), que consisten en un material de distribución para el gas y sobre ello, una capa de material oxidante de CH_4 (MOM), derivado del compost. La microbiota de esta cubierta, oxida el CH_4 a CO_2 , encontrando el mismo efecto que en el caso del LFG con antorcha. Esta solución tiene un coste menor que la implantación de un sistema de gas LFG, ya que no hay que instalar un sistema de tuberías, por lo que es una alternativa de gran valor para estas islas.

En la literatura se observa que la mayoría de inversiones del MDL van destinadas a proyectos de gran escala (Mariyappan y cols. s. f.). Además, los proyectos se ubican, principalmente, en China, India y Brasil. En estos países es donde se obtienen el 85% de

los CERs (Qui, 2018), por lo que la dispersión geográfica es pequeña, como se observa en la figura 6.

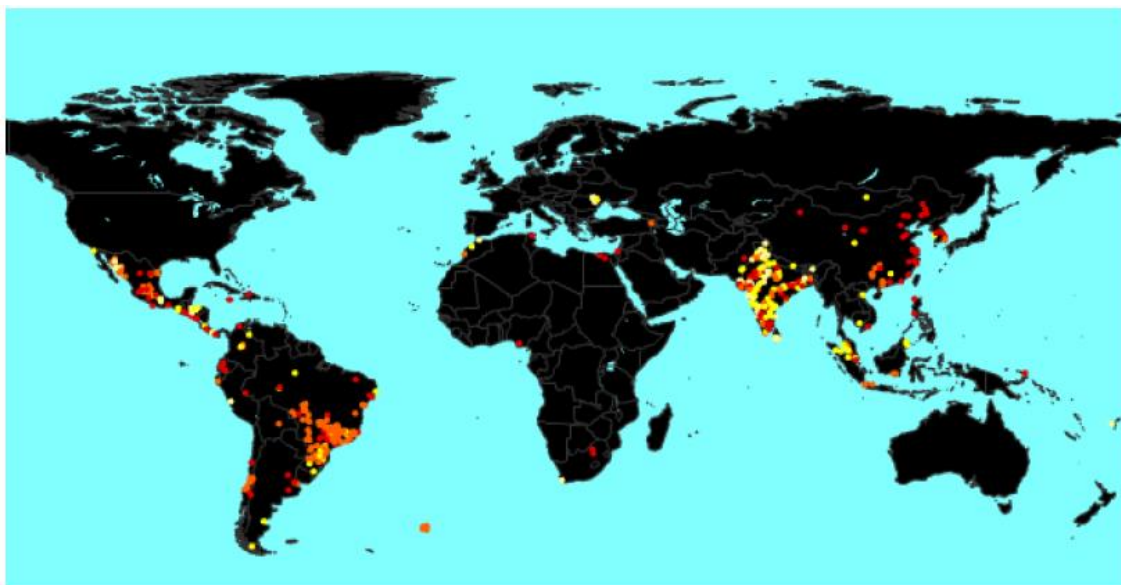


Figura 6. Distribución geográfica de los CDM (Naciones Unidas, 2020)..

Esto afecta sobre todo a los países más vulnerables a los efectos del cambio climático, como son los SIDS y los países en vías de desarrollo (LDC, por sus siglas en inglés *Less-developed countries*), ya que las acciones se concentran en ciertos países y la mayoría no se pueden beneficiar del MDL.

Los proyectos a gran escala son mejores desde el punto de vista de la economía de escala, ya que permiten reducir más emisiones con un menor coste, además de que las tasas no son tan grandes proporcionalmente en comparación al beneficio bruto, a diferencia de los proyectos a pequeña escala que, además de las tasas, tienen que hacer frente a barreras institucionales en el país receptor del proyecto (Michaelowa y Jotzo, 2005). Si bien es cierto que los proyectos a pequeña escala se benefician de tener metodologías más sencillas, el factor económico limita mucho la realización de estos proyectos. Por otro lado, dos de los objetivos del MDL son el traspaso de tecnología y la integración del proyecto en la economía local, objetivos que se dan con mayor facilidad en los proyectos a pequeña escala (Olsen y Fenhann, 2008). Tampoco hay que olvidar que los proyectos a menor escala son más beneficiosos para los objetivos del MDL debido a que ayudan más a los países menos desarrollados y en mayor situación de vulnerabilidad, como pueden ser los SIDS.

1.2. ANTECEDENTES.

Seychelles es un estado formado por 115 islas, incluido en los denominados SIDS (figura 7) y su población se estima en 92000 personas (Lai y cols., 2016). Al ser un SIDS, el capital con el que cuenta es limitado, lo que dificulta la creación de proyectos que promuevan el reciclaje.



Figura 7. Localización de Seychelles (Lai y cols., 2016).

El vertedero principal de Seychelles se ubica en Providence, en la isla de Mahé, como se puede observar en la figura 8. Además, existen dos vertederos más pequeños, situados en las islas de Anse Royale y de La Digue. El vertedero principal se compone de dos unidades: Vertedero de Providence I y Vertedero de Providence II, ubicadas cerca del puerto. La primera, que comenzó su actividad en 1995, fue clausurada en 2016, aunque aún sigue recibiendo residuos líquidos, por lo que no está totalmente clausurada (Nippon Koei, 2019). Por otra parte, la segunda comenzó su actividad en 2016 y se estima que llegue a su máxima capacidad en 2025 (Lai y cols., 2016).

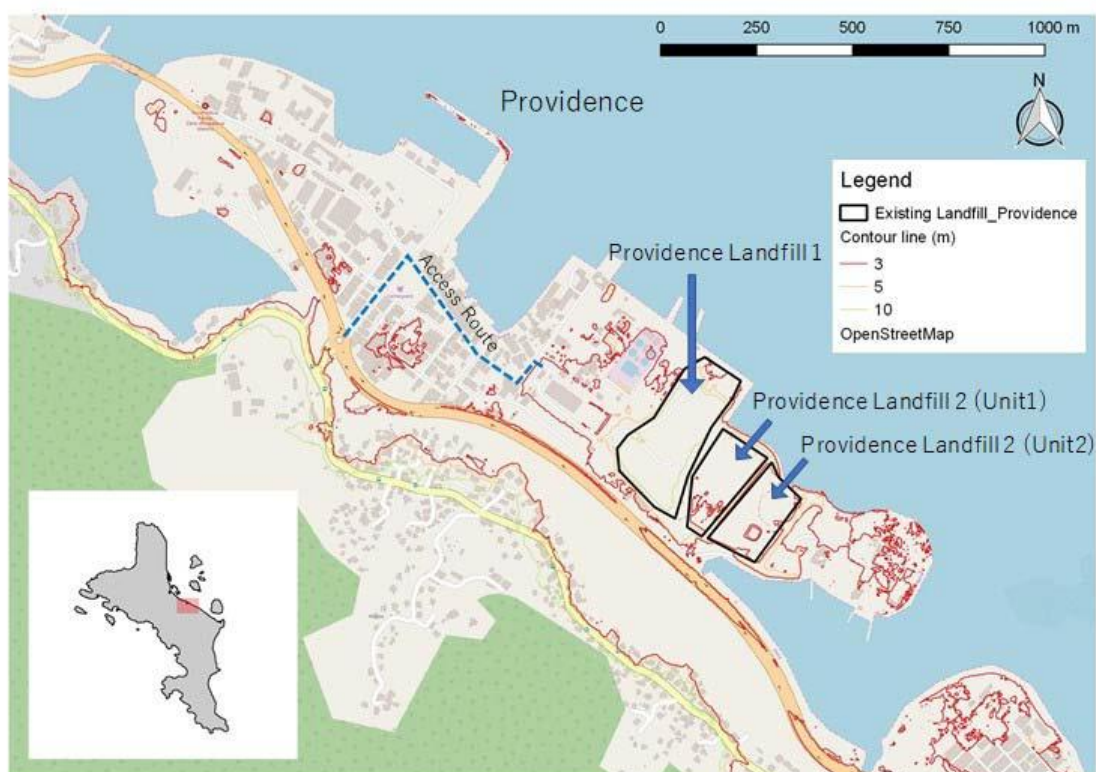


Figura 8. Disposición de las unidades del vertedero (Nippon Koei, 2019).

La unidad 1 (PL1) tiene un área estimado en 65,000 m². No ha tenido un plan detallado de llenado, sino que se ha seguido una secuencia general de llenado, depositando por capas los residuos en sitios concretos, compactándolos y cubriéndolos. Los principales problemas de la unidad 1, son, actualmente, los siguientes:

- Acumulación de lixiviados debida a la falta de sistema de captura para éstos, lo que desemboca también en su emisión al mar.
- Emisión de CH₄ a la atmósfera debido a que no existe sistema de captura de gases.
- Incendios debidos a la emisión de CH₄.
- Contaminación marina debida a los residuos que escapan del vertedero hacia el mar, debido a las corrientes de aire.

Por su parte la unidad 2 (PL2), está dividida en dos subunidades, la subunidad 1 (PL2-1) y la subunidad 2 (PL2-2), con unas áreas de 35,100 m² y 43,900 m², respectivamente, y un volumen total para la unidad 2 (PL2) estimado en 710,000 m³. A pesar de que el proyecto de la unidad 2 se ha realizado con una estimación de vida útil de 21 años, actualmente se estima que la subunidad 1 (PL2-1), que es la única construida hasta el momento, llegará a su máxima capacidad en 2022, mientras que si se tiene en cuenta también la subunidad 2 (PL2-1 + PL2-2), la máxima capacidad de la unidad dos del vertedero (PL2) se alcanzará en 2025 (Nippon Koei, 2019). Además, se espera que cuando la unidad 2 (PL2) alcance su máxima capacidad, tenga los mismos problemas que la unidad 1 (PL1), como seguir recibiendo residuos y no cerrarse de forma correcta, generando los mismos problemas en esta segunda unidad.

En la tabla 1, se pueden observar los flujos anuales de residuos que ha recibido el vertedero, además de las proyecciones futuras. Por su parte, en la tabla 2, se muestran la composición en base a las fracciones resultantes de diferentes análisis de clasificación en la báscula puente de la unidad 2 (PL2) (Schebek y cols., 2017).

Tabla 1. Flujo anual de residuos en el vertedero y proyecciones futuras (Schebek y cols., 2017).

PL1						PL2		
	Flujo anual de residuos	Flujo acumulado de residuos		Flujo anual de residuos	Flujo acumulado de residuos	año	Flujo anual de residuos	Flujo acumulado de residuos
año	Ton/año	Ton	año	Ton/año	Ton		Ton/año	Ton
1995	30775 ^a	30775	2006	49041	465312	2016	73225	73225
1996	30775 ^a	61550	2007	53854	519166	2017	77925 ^b	151150
1997	30775 ^a	92325	2008	48896	568062	2018	81482 ^c	232632
1998	30775 ^a	123100	2009	49447	617509	2019	83249 ^c	315882
1999	30775 ^a	153875	2010	75539	693048	2020	84430 ^c	400312
2000	42636	196511	2011	66866	759914	2021	89350 ^c	489662
2001	41787	238298	2012	62258	822172	2022	93680 ^c	583342
2002	43404	281702	2013	75533	897705	2023	97550 ^c	680892
2003	48839	330541	2014	79226	976931	2024	101057 ^c	781949
2004	40842	371383	2015	72319	1049250	2025	104276 ^c	886225
2005	44888	416271						

^a debido a la falta de datos, se considera el primer registro grabado (1999).

^b Los datos de 2017 han sido proyectados por Schebek y cols. (2017) basándose en la extrapolación de una medida directa en la unidad 2 (PL2).

^c Datos para 2018 y años posteriores han sido proyectados como propone Lai y cols. (2016), usando un modelo de relación de vertederos basado en la población (datos de Naciones Unidas) y en una proyección del PIB per cápita.

Tabla 2. Composición másica por tipo de residuo del PL2 en 2016 y 2017.

Tipo de residuo (%)			
	2017	2016	Media
Madera y productos derivados.	14.9	2.7	8.8
Pulpa, papel y cartón	20.6	15.1	17.8
Alimentos, desperdicios de alimentos, bebidas y tabaco	13.8	31.7	22.8
Textiles	3.2	5.8	4.5
Residuos de jardines, jardines y parques	6.5	10.3	8.4
Vidrio, plástico, metal, otros desechos	41	34.4	37.7
TOTAL	100	100	100

1.2.1. Cubierta oxidante de metano.

Se trata de una cubierta compuesta por el MOM, que es un derivado de biomasa estabilizada (SB, por sus siglas en inglés *Stabilized Biomass*). Un material SB común es

el compost, que refinado y enriquecido con microbiota forma el MOM, que es el principal material de la cubierta. No obstante, no será el único, ya que se necesita también una base de material de distribución, el cual consiste en un material con un tamaño de grano considerable, como puede ser arena o grava. Este material permite que el gas se distribuya uniformemente por toda la base de la cubierta, reduciendo la presencia de puntos calientes que puedan dar lugar a fugas de CH_4 . La figura 9 muestra un esquema sencillo de una cubierta oxidante de CH_4 .

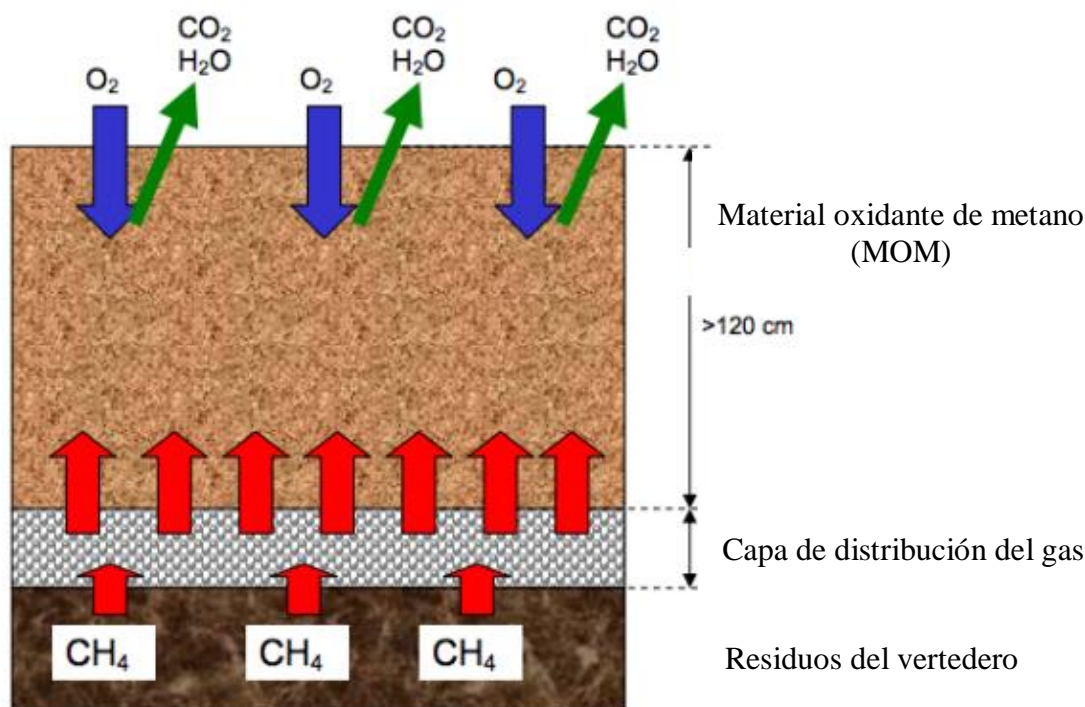


Figura 9. Esquema básico de una cubierta oxidante de metano.

Estas cubiertas se usan también en vertederos que usan la tecnología LFG, evitando la emisión de los gases que escapan al sistema de colección.

La bibliografía recomienda valores de 2 metros de grosor en la capa oxidante de CH_4 y de 0.4 metros en la capa de distribución de gas (Naciones Unidas, 2011).

2. OBJETIVOS.

En base al marco que propone el MDL, y la situación del vertedero de Seychelles, el presente estudio se enfoca en el **análisis tecno-económico de la implantación de una cubierta oxidante de CH₄ en el vertedero de Providence, Seychelles**. Para la consecución del objetivo principal, se establecen una serie de objetivos parciales:

1. Análisis de la bibliografía existente referente tanto a otras acciones en vertederos, para conocer las acciones necesarias para la instalación de la capa oxidante de CH₄, como a otros proyectos del MDL con el fin de observar el funcionamiento de este tipo de acciones. Además, también es necesario recopilar datos sobre el mercado de CERs.
2. Revisar la metodología propuesta por Naciones Unidas e implementación de las ecuaciones junto con los datos de Seychelles, con el fin de obtener una estimación del número de CERs generados cada año.
3. Realizar un análisis técnico, obteniendo las cantidades de material necesarias totales y anuales y definiendo el tiempo del proyecto. También, definir otros parámetros como los precios de los materiales a utilizar.
4. Realizar un estudio económico que tenga en cuenta el análisis técnico previo, y se valoren distintas casuísticas para observar la rentabilidad de la acción en distintas circunstancias.

3. METODOLOGÍA.

Se distinguen dos metodologías distintas, la de la parte técnica, que es la marcada por el MDL, y la de la parte económica, que usa indicadores financieros.

La metodología se ha aplicado para cada una de las unidades del vertedero (i.e. PL1 y PL2) por separado, y se han tratado 4 casos de estudio distintos, en base a los posibles períodos de obtención de créditos que establece el MDL, 7, 10, 14 y 21 años. Dentro de esos tiempos de obtención de créditos, se ha establecido un tiempo para cubrir la superficie del vertedero en los períodos comentados anteriormente, cubriéndolo todos los años de forma equitativa.

El caso base es la construcción de una cubierta oxidante de CH_4 sobre el vertedero de Providence, Seychelles. Para ello primero deberá realizarse una reestructuración del vertedero, tras la cual se comenzará a cubrir por partes. Se aplicará primero una capa de grava de 0.4 metros de grosor, que servirá como material de distribución del gas, para evitar puntos calientes. Sobre ella se situará la capa de MOM, que se obtendrá del refinado de compost, y que tendrá un grosor de 2 metros, de acuerdo con la bibliografía (Naciones Unidas, 2011).

Los distintos casos de estudio se diferencian en el tiempo que se tarda en cubrir el vertedero y en la duración de la generación de CERs. Estos casos se realizan para valorar todas las opciones que pueda haber ya que existirá una gran dependencia de la disponibilidad de las materias primas. Además, se presentan dos casos distintos, en uno el compost es obtenido en la propia isla de Mahé, y en el otro es traído en barco desde Sudáfrica.

Es importante destacar que para la composición del vertedero, al no existir datos propios del gobierno, se asumen las fracciones másicas de los residuos medias entre los años 2016 y 2017 (Schebek y cols., 2017), además de los flujos indicados en dicha referencia, mostrados ya en la tabla 1.

3.1. ANÁLISIS TÉCNICO.

La metodología para la implantación de una cubierta oxidante de CH_4 está marcada por las Naciones Unidas, que además establece una serie de requisitos, como son:

- Debe ser aplicada a un vertedero con unas emisiones de CH_4 superficiales de menos de 4 litros por metro cuadrado y hora.
- Debe ser aplicada a vertederos ya cerrados y que no admitan nuevos residuos.
- Las medidas se deben limitar a reducir en un máximo anual de 60 $\text{ktCO}_2\text{eq.}$, debido a la categoría de proyecto en la que se encuentra.

Los límites del proyecto son el sitio físico y geográfico:

- Donde la aplicación de la cubierta oxidante de CH_4 es aplicada, es decir, el vertedero.
- Donde se produce el refino de la biomasa estabilizada a MOM.
- Donde ocurre el transporte del MOM.

Una vez conocidos los límites del sistema, se establece el escenario base, es decir, el escenario en el que no existe el proyecto y las emisiones son emitidas normalmente a la atmósfera. Aunque hay que excluir las que puedan ser capturadas o quemadas para cumplir con requerimientos de seguridad o regulaciones legales, tanto nacionales como locales.

La ecuación 1 es la ecuación usada para el cálculo de las emisiones evitadas. En la figura 10 se puede observar gráficamente en qué consiste.

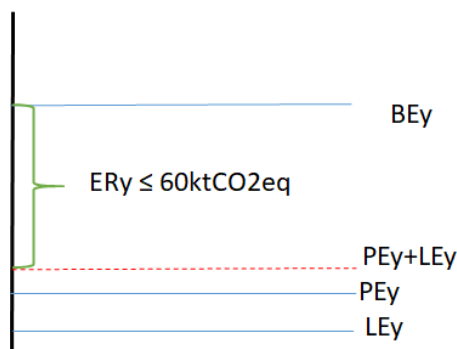


Figura 10. Diagrama donde se observan los parámetros calculados para el análisis técnico.

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (1)$$

Donde:

ER_y = Emisiones reducidas en el año y. Unidades en tCO₂eq.

BE_y = Emisiones de referencia de CH₄ en el año y. Unidades en tCO₂eq.

PE_y = Emisiones generadas por la actividad del proyecto en el año y. Unidades en tCO₂eq.

LE_y = Emisiones debidas a fugas en el año y. Como se explicó anteriormente, toma el valor de 0. Unidades en tCO₂eq.

Para el cálculo de las emisiones en el escenario base se usa la ecuación 2.

$$\begin{aligned}
BE_{CH_4,SWDS,y} = & \varphi * (1 - f) * GWP_{CH_4} * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * DOC_f \\
& * MCF \\
& * \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} * DOC_j * e^{-k_j*(y-x)} * (1 - e^{-k_j})
\end{aligned} \tag{2}$$

Donde:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$ = Emisiones de CH₄ evitadas durante el año y, evitando el vertido de residuos en el vertedero durante el período desde el comienzo del proyecto hasta el final del año y. Unidades en tCO₂eq.

φ = Factor de corrección del modelo para tener en cuenta la incertidumbre. La metodología establece un valor de 0.9.

f = Fracción de CH₄ capturado en el vertedero y quemado o usado de otra forma. En este caso el valor es 0.

GWP_{CH_4} = Potencial de calentamiento global del CH₄, cuyo valor es 28 (Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos, s. f.).

OX = Factor de oxidación, que refleja el CH₄ que es oxidado en el propio suelo. La metodología establece un valor de 0.1.

F = Fracción de CH₄ en el gas del vertedero. La metodología establece un valor de 0.5.

DOC_f = Fracción de carbono orgánico degradable (DOC, por sus siglas en inglés *degradable organic carbon*) que se puede descomponer. La metodología establece un valor de 0.5.

MCF = Factor de corrección del CH₄ generado. La metodología establece distintos valores según las condiciones del vertedero y si está siendo gestionado correctamente o no. Para casos como el de Seychelles el valor que establece es de 0.8.

$W_{j,x}$ = Cantidad de residuos orgánicos de tipo j cuyo vertido es evitado en el año x. Unidades en toneladas.

DOC_j = Fracción de carbono orgánico degradable (en masa) en los residuos de tipo j. La metodología diferencia entre residuos secos y húmedos, en este caso debido al clima y la localización se trata de residuos húmedos, por lo que sus valores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Fracción de carbono orgánico degradable en masa en los residuos de tipo j.

Tipo de residuo (j)	DOC_j (%)
Madera y productos derivados	43
Pulpa, papel y cartón	40
Alimentos, desperdicios de alimentos, bebidas y tabaco	15
Textiles	24
Residuos de jardines, jardines y parques	20
Vidrio, plástico, metal, otros desechos	0

k_j = Tasa de descomposición para los residuos de tipo j. También diferencia por la humedad de los residuos y por clima. En el caso de Seychelles, cuyo clima es tropical y cuyas temperaturas se sitúan por encima de los 20°C, los valores son los mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Tasa de descomposición para los residuos de tipo j.

Tipo de residuo j		k_j
No degradables	Vidrio, plástico, metal, otros desechos	0

<i>Lentamente degradables</i>	Pulpa, papel y cartón	0.07
	Textiles	0.07
	Madera y productos derivados	0.035
<i>Moderadamente degradables</i>	Residuos de jardines, jardines y parques	0.17
<i>Rápidamente degradables</i>	Alimentos, desperdicios de alimentos, bebidas y tabaco	0.40

- j = Tipo de residuo. Se tienen los considerados en el apartado de antecedentes del trabajo, es decir, los mostrados en la tabla 2.
- x = Año desde el comienzo de la actividad del vertedero hasta el comienzo de la actividad del proyecto de cubrir el vertedero.
- y = Año desde el comienzo de la actividad del proyecto de cubrir el vertedero.

Con el valor de las emisiones emitidas en ausencia del proyecto, se pueden hallar las evitadas mediante el uso de la cubierta. Con la ecuación 3 se obtienen las emisiones evitadas para cada año, que van en función del área cubierta.

$$BE_y = BE_{CH_4,SWDS,y} * Af_{MOL,y} \quad (3)$$

Donde:

$$Af_{MOL,y} = \text{Área cubierta en porcentaje en el año } y.$$

Una vez calculadas las emisiones evitadas por el proyecto, habrá que calcular también las emisiones que son generadas por el desarrollo del proyecto, con el fin de obtener las emisiones netas. Estas emisiones se calculan en la ecuación 4.

$$PE_y = PE_{y,transp} + PE_{y,energía} + PE_{y,MOL} \quad (4)$$

Donde:

$PE_{y,transp}$ = Emisiones generadas por el transporte de las materias primas en el año y. Unidades en tCO₂eq.

$PE_{y,energía}$ = Emisiones generadas debidas a la generación de energía en el año y. Incluye también las emisiones debidas al refinado de la biomasa estabilizada. Unidades en tCO₂eq.

$PE_{y,MOL}$ = Emisiones residuales de CH₄ en el área cubierta en el año y. Unidades en tCO₂eq.

Se observa que el total de las emisiones generadas por el proyecto, son la suma de las emisiones debidas al transporte de las materias primas, a la generación de energía y las emisiones residuales en las áreas cubiertas. Es importante destacar que la metodología establece que no se consideren fugas.

Los términos de la ecuación 4 se calculan en las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$PE_{y,transp} = \sum_m EF_{transp,CO_2} * (Q_{y,m} / CC_m) * DAF_m \quad (5)$$

Donde:

EF_{transp,CO_2} = Factor de emisión del CO₂ usado para transporte. Unidades en tCO₂eq./Km.

$Q_{y,m}$ = Cantidad de material m transportado en el año y. Unidades en toneladas.

CC_m = Capacidad media de los camiones usados para el transporte del material m. Unidades en toneladas por camión.

DAF_m = Distancia media para el transporte del material m. Unidades en Kilómetros por camión.

m = Material transportado. En este caso la biomasa estabilizada y el material de distribución.

En la ecuación 6 se observan dos sumandos, el primero hace referencia al diésel consumido en la generación de electricidad y funcionamiento de las máquinas y el segundo a la generación de electricidad para el refinado. Las emisiones debidas al refinado se han calculado teniendo en cuenta los valores aportados por un proyecto del mismo tipo del MDL en Gaobeidian, China (Naciones Unidas, 2011). En este proyecto se emiten 9 tCO₂eq. para el refinado de 20,000 Kg de MOM.

$$PE_{y,energía} = F_{cons,y} * NCV * EF_{diésel,CO_2} + C_{comp,y} * \frac{9}{20000} \quad (6)$$

Donde:

$F_{cons,y}$ = Diésel consumido para la generación de energía del tractor en el año y. Unidades en Kg.

NCV = Valor calórico del diésel. Unidades en MJ/Kg.

$EF_{diésel,CO_2}$ = Factor de emisión del CO₂ usado para la generación de electricidad mediante la combustión de diésel. Unidades en tCO₂eq./MJ.

$C_{comp,y}$ = Cantidad de compost necesaria en el año y. Unidades en toneladas.

El término del diésel consumido para mover el tractor, $F_{cons,y}$, se calcula como indica la ecuación 7.

$$F_{cons,y} = \rho_{diésel} * HT * CM_{tract} \quad (7)$$

Donde:

$\rho_{diésel}$ = Densidad del diésel. Unidades en Kg/litro. Se ha seleccionado el valor de 0.85 Kg/litro (Speight, 2011).

HT_y = Horas de trabajo necesarias de tractor en el año y . Unidades en horas/año. Calculado en la ecuación 14.

CM_{tract} = Consumo medio del tractor. Unidades en litros/hora. Se selecciona un valor estimado de 0.15 litros/hora (Cabrero y Catalán, 2011).

Es necesario tener en cuenta que el CH_4 oxidado no va a ser todo el que se genere, si no que una porción se escapará sin ser degradado. Para tener en cuenta esa fracción, se usa la ecuación 8.

$$PE_{y,MOL} = BE_y * (1 - OX_{MOL,y}) \quad (8)$$

Donde:

$OX_{MOL,y}$ = Factor de oxidación que considera el CH_4 oxidado en la cubierta. La metodología sugiere un valor de 90%.

Una vez calculadas las emisiones debidas al proyecto y las emisiones en ausencia del proyecto, con la ecuación 8 se pueden obtener las emisiones evitadas por el mismo.

3.2. ANÁLISIS ECONÓMICO.

Para el análisis económico se han tenido en cuenta dos tipos de costes distintos, los costes de inversión y los costes operacionales. Los de inversión corresponden el estudio técnico de la obra, los costes de adecuación del terreno, la adquisición de maquinaria para la extensión de la cubierta y a las tasas que impone el MDL.

3.2.1. Costes de inversión.

El primero de todos es el estudio técnico, el cual se encarga a un tercero. El cálculo se basa en la estimación que hace Scheutz (Scheutz y cols., 2014), que estima el coste con el salario de un ingeniero durante 4 meses. En este caso se toma un salario de ingeniero igual al precio actualizado del artículo comentado anteriormente y se multiplica por los 4 meses, como se observa en la ecuación 9.

$$CI_1 = Si * 4 \quad (9)$$

Donde:

CI_1 = Coste del estudio técnico. Unidades en €.

Si = Salario de ingeniero (Scheutz y cols., 2014). Valor de 7084 €/mes.

El siguiente coste de inversión es la adecuación del terreno, debido a la forma de almacenamiento de residuos el vertedero debe ser nivelado para la correcta construcción de la cubierta. Para el cálculo de este valor, se tiene en cuenta el coste mensual del alquiler de la maquinaria necesaria, en este caso 15,000 €/mes (Costhack, 2020), y los meses que se tarda en nivelar.

Para el cálculo de los meses que se tarda en extender se supone una capacidad de la excavadora de 120 m²/h (Maquinarias pesadas, s. f.). Con esto y con una jornada de 8 horas al día, trabajando 20 días al mes, se obtienen los meses que se tarda en nivelar el vertedero. En la ecuación 10 se observa este cálculo junto con el coste mensual de la maquinaria, obteniendo el coste de inversión en la adecuación del terreno.

$$CI_2 = 15,000 * \frac{Ar}{120 * 8 * 20} \quad (10)$$

Donde:

CI_2 = Coste de adecuación del terreno. Unidades en €.

Ar = Área del vertedero. Unidades en m².

Para la maquinaria encargada de extender el compost y la grava se ha seleccionado un tractor de referencia, con un coste de 65,000 € (AGFACTS, 2020).

Finalmente, para acabar con los costes de inversión, las tasas correspondientes a la fase de planificación construcción contempladas en el MDL. Estas tasas se encuentran entre 18,500 € y 67,000 €, ya que las de construcción son consideradas despreciables (Naciones Unidas, 2007).

3.2.2. Costes operacionales.

Estos costes se dividen en seis contribuciones, siendo éstas los sueldos de los empleados, las tasas operacionales, el combustible, las materias primas, la monitorización y el mantenimiento.

Antes de nada, se calculan las cantidades de materia prima necesarias. Éstas se calculan con el área del vertedero, la altura de cada capa y las densidades. En el caso del compost es necesario introducir un factor que estima la pérdida de material en el refino. Estos cálculos se muestran en las ecuaciones 11 y 12.

$$C_{comp,y} = \frac{Ar * h_{MOM} * \rho_{comp}}{y} * \frac{27,000}{20,000} \quad (11)$$

Donde:

h_{MOM} = Altura de la capa de MOM. Se ha seleccionado, en base a otros proyectos similares, el valor de 2 metros que se mencionó anteriormente.

ρ_{comp} = Densidad del compost. Unidades en toneladas/m³. El valor usado es de 0.5 toneladas/m³ (Naciones Unidas, 2011).

$$C_{grava,y} = \frac{Ar * h_{grava} * \rho_{grava}}{y} \quad (12)$$

Donde:

$C_{grava,y}$ = Cantidad de grava necesaria en el año y. Unidades en toneladas/año.

h_{grava} = Altura de la capa de grava. Se ha seleccionado, en base a otros proyectos similares, el valor de 0.4 metros que se mencionó anteriormente.

ρ_{grava} = Densidad de la grava. Se selecciona un valor de 1500 Kg/m³ (Áridos El Pinar, s. f.).

Para el cálculo de los sueldos, primero se deben calcular las horas de trabajo y el rendimiento de los tractores, calculándose este último como muestra la ecuación 13. Esta ecuación se basa en la estimación de Licon Ingeniería (Licon Ingeniería, s. f.).

$$Rend = \frac{CC * FL * FC * Efic}{Cic} \quad (13)$$

Donde:

- Rend* = Rendimiento de la máquina seleccionada. Unidades en m³/h.
- CC* = Capacidad de carga del cazo. Se selecciona un cazo con una capacidad de carga de 0.68 m³ (Miniexcavadoraszgz, s. f.).
- FL* = Factor de llenado. La empresa sugiere un 100%.
- FC* = Factor de carga. La empresa sugiere un valor del 75%.
- Efic* = Eficiencia de hora de trabajo. La empresa considera un valor de 55/60.
- Cic* = Ciclo de carga en horas. La empresa sugiere un valor de 45 segundos.

Con este rendimiento se pueden calcular las horas de trabajo del tractor mediante la ecuación 14.

$$HT_y = \frac{C_{comp,y}}{\rho_{comp}} * \frac{20,000}{27,000} * \frac{1}{Rend} + \frac{C_{grava,y}}{\rho_{grava}} * \frac{1}{Rend} \quad (14)$$

Con estas horas de trabajo se calcula el número de operarios necesarios para extender el compost. Se supone una jornada laboral semanal de 40 horas. Los sueldos de los empleados se han estimado en base al salario medio en Seychelles (Average Salary Survey, 2020). El ingeniero se supone que no tiene que dedicarse completamente a este proyecto, sino que lo debe supervisar periódicamente, por lo que se estima su dedicación a este proyecto en un quinto del año. Con estos datos y los calculados anteriormente, en la ecuación 15 se obtiene el coste operacional en sueldos.

$$COp_{1,y} = \frac{HT_y}{52 * 40} * SSop + 0.2 * SSing \quad (15)$$

Donde:

- COp_{1,y}* = Coste operacional por salarios en el año y. Unidades en €/año.

$SSop$ = Salario anual de cada operario. Se selecciona un valor de 9,600 €/año.

$SSing$ = Salario anual del ingeniero. Se selecciona un valor de 15,000 €/año

Para los costes de tasas operacionales, se escoge la estimación que hace Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2007), es decir, 5,000 € más el 2% de los beneficios obtenidos con los CERs. Este cálculo se observa en la ecuación 16.

$$COp_{2,y} = 5,000 + 0.02 * ER_y * P_{CER} \quad (16)$$

Donde:

$COp_{2,y}$ = Coste operacional de tasas en el año y. Unidades en €/año.

P_{CER} = Precio del CER. Unidades en €/tCO₂eq.

Por su parte, para el coste del combustible, es importante destacar que, para el transporte vía marítima, el coste se incluye en el coste de la materia prima, dado que se utiliza el sistema FOB (libre a bordo, por sus siglas en inglés *Free on board*). El coste operacional total de combustible es la suma del usado por los camiones y el tractor, además del necesario para generar energía para el refino, como se observa en la ecuación 17.

$$COp_{3,y} = CC_{cam,y} + CC_{tract,y} + CC_{refino,y} \quad (17)$$

Donde:

$COp_{3,y}$ = Coste de combustible total en el año y. Unidades en €/año.

$CC_{cam,y}$ = Coste del combustible para el transporte en camión en el año y. Unidades en €/año.

$CC_{tract,y}$ = Coste del combustible necesitado por el tractor en el año y. Unidades en €/año.

$CC_{refino,y}$ = Coste del combustible para la generación de la energía necesaria para el refinado de la biomasa estabilizada en el año y. Unidades en €/año.

El coste del combustible usado por los camiones se calcula en base a los kilómetros recorridos, la capacidad de carga, el coste del diésel, la cantidad de materias primas (compost y grava) y el consumo medio de los camiones, como se observa en la ecuación 18.

$$CC_{cam,y} = \sum_m P_{diésel} * CM_{cam} * DAF_m * Q_{y,m} * \frac{1}{CC_{y,m}} \quad (18)$$

Donde:

$P_{diésel}$ = Precio del diésel. Unidades en €/litro. Se selecciona el valor de 0.67 €/litro basado en el coste medio en Seychelles (Global Petrol Prices, 2020).

CM_{cam} = Consumo medio de los camiones. Unidades en litros/Km. Se selecciona un valor estimado de 0.35 litros/Km.

Por otro lado, para el tractor se usa el consumo medio por hora y las horas de trabajo, como se observa en la ecuación 19.

$$CC_{tract,y} = P_{diésel} * HT * CM_{tract} \quad (19)$$

Finalmente, para calcular el combustible necesario para generar energía en el refino, se realiza utilizando la aproximación realizada para el caso China (Naciones Unidas, 2011) y se obtiene en base a las emisiones calculadas, el combustible usado, como se observa en la ecuación 20.

$$CC_{refino,y} = C_{comp,y} * \frac{9}{20000} * \frac{1}{EF_{diésel,CO2} * NCV * \rho_{diésel}} \quad (20)$$

Para el coste de las materias primas se multiplican las cantidades anuales necesarias de cada material por su precio, como se observa en la ecuación 21.

$$COp_{4,y} = C_{comp,y} * P_{comp} + C_{grava,y} * P_{grava} \quad (21)$$

Donde:

$COp_{4,y}$ = Coste de las materias primas en el año y. Unidades en €/año.

P_{comp} = Precio del compost usado para obtener el MOM. Unidades en €/tonelada.

P_{grava} = Precio de la grava. Unidades en €/tonelada.

Por otro lado, para los costes de monitorización y mantenimiento se han usado como referencia los costes unitarios (€/m²) calculados por Pivato (Pivato y cols., 2018).

3.2.3. Beneficios.

Para el cálculo del beneficio bruto se usa la ecuación 22. El único beneficio económico que se recibe en este proyecto es el propuesto por el MDL, el cual es el beneficio por la venta de CERs, por lo que este beneficio depende en gran medida del precio de éstos últimos.

$$BB_y = ER_y * P_{CER} \quad (22)$$

Donde:

BB_y = Beneficio bruto en el año y. Unidades en €/año.

P_{CER} = Precio del CER. Actualmente situado en 0.30 €.

Finalmente, para el cálculo del beneficio neto anual, se restarán los costes operacionales al beneficio bruto, como se observa en la ecuación 23. Además, en el año 0 se realizará toda la inversión inicial. Con esto podremos observar los flujos de caja para cada año.

$$BN_y = BB_y - COp_{1,y} - COp_{2,y} - COp_{3,y} - COp_{4,y} - COp_{5,y} - COp_{6,y} \quad (23)$$

Donde:

BN_y = Beneficio neto en el año y . Unidades en €/año.

$COp_{5,y}$ = Coste operacional debido a la monitorización. Unidades en €/año.

$COp_{6,y}$ = Coste operacional debido al mantenimiento. Unidades en €/año.

3.2.4. Indicadores de rentabilidad.

Para analizar la rentabilidad del sistema se ha usado el Valor Actual Neto (VAN), el cual analiza valor presente de los flujos de caja netos originados por la inversión. Su fórmula es la mostrada en la ecuación 24.

$$VAN = \sum_{y=1}^n \frac{BN_y}{(1+i)^y} \quad (24)$$

Donde:

VAN = Valor actual neto. Unidades en €.

i = Tasa de descuento. Unidades en porcentaje. Se han analizado tres valores distintos: 5%, 10% y 15%.

Un VAN indica una inversión rentable, mientras que un VAN negativo indica una inversión con pérdidas, es decir, no rentable.

3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Con el fin de obtener una valoración más amplia y que abarque distintas casuísticas se han realizado análisis de sensibilidad a tres variables. Estas variables son las siguientes:

- Costes capitales, los cuales se han disminuido y aumentado un 20%.
- CERs generados, los cuales varían en función de la correcta oxidación en la cubierta. La metodología establece un valor del factor de oxidación en la cubierta del 90%, pero para este análisis se van a tener en cuenta valores del 50% y del 30%.

Además de estos análisis de sensibilidad, se han realizado dos casos de estudio distintos para cada unidad del vertedero. En uno de ellos se considera que el compost es traído de Sudáfrica a un precio de 389 €/tonelada (Trade Map, 2020), y en el otro se considera que

se genera en Seychelles y tiene un coste de 25 €/tonelada. Este coste tan bajo es debido a que su generación se produce en la planta de compost que existe en la isla y que, actualmente, se encuentra cerrada. El precio de la grava en ambos casos es de 11 €/tonelada, ya que se supone que se obtiene en la misma isla.

4. RESULTADOS.

Para los resultados, primero, se ha cuantificado la reducción de emisiones que genera el proyecto. De esta forma se puede analizar cuáles son los casos más ventajosos desde el punto de vista técnico.

Los resultados se muestran en las figuras 11, 12, 13 y 14. En la leyenda aparecen los años que se tarda en cubrir el vertedero, el eje de abscisas representa los años que dura el período crediticio y en el eje de ordenadas aparecen las emisiones evitadas en cada caso.

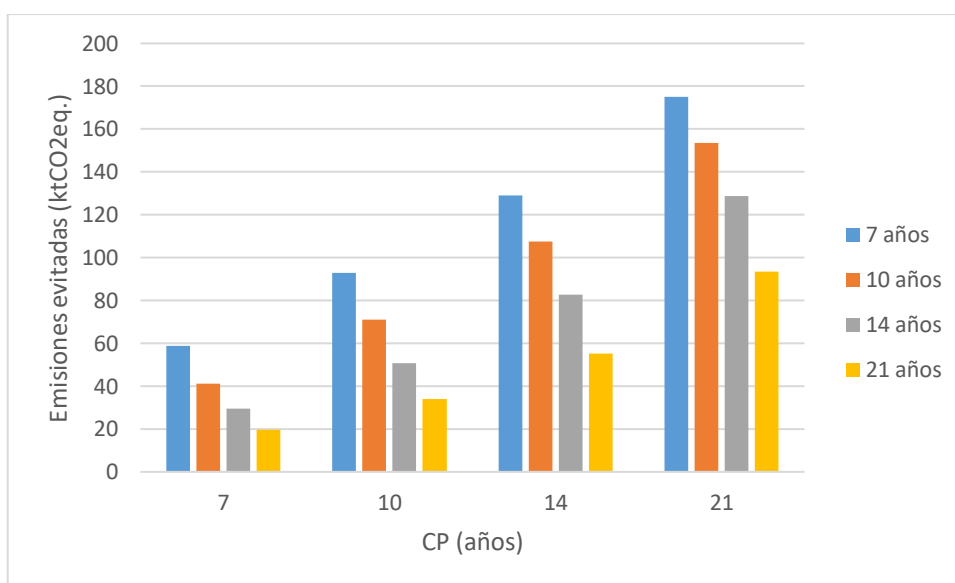


Figura 11. Emisiones evitadas en PL1 con compost importado.

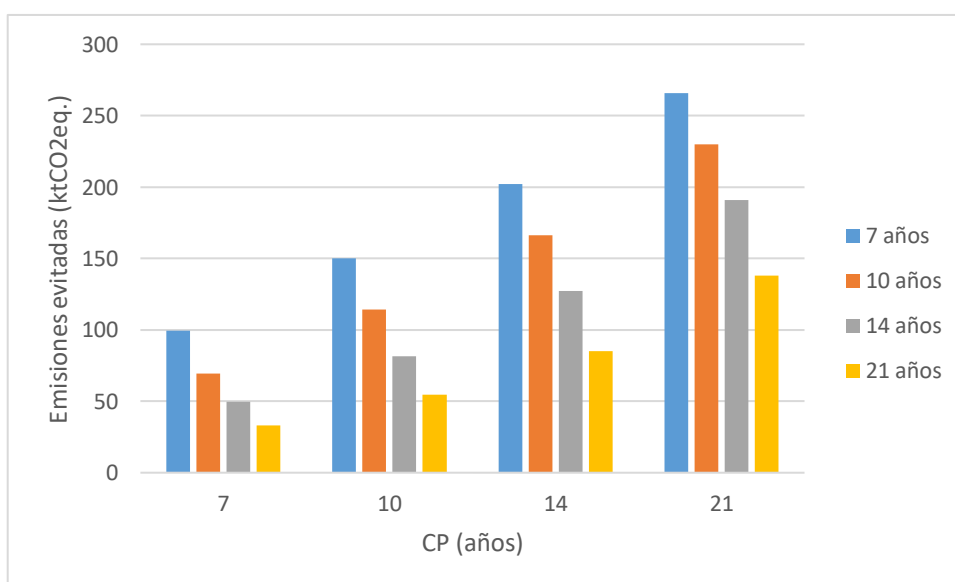


Figura 12. Emisiones evitadas en PL2 con compost importado.

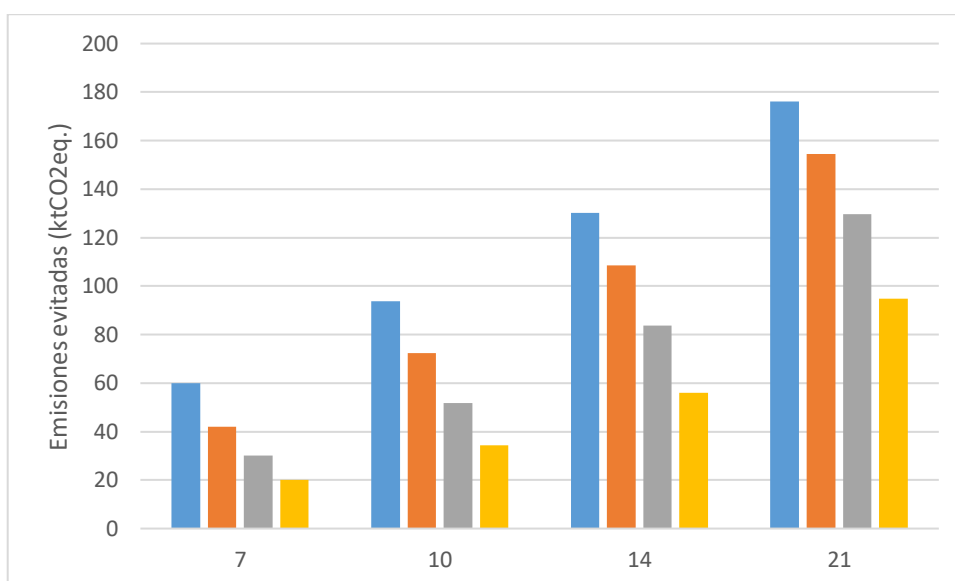


Figura 13. Emisiones evitadas en PL1 con compost obtenido en la propia isla.

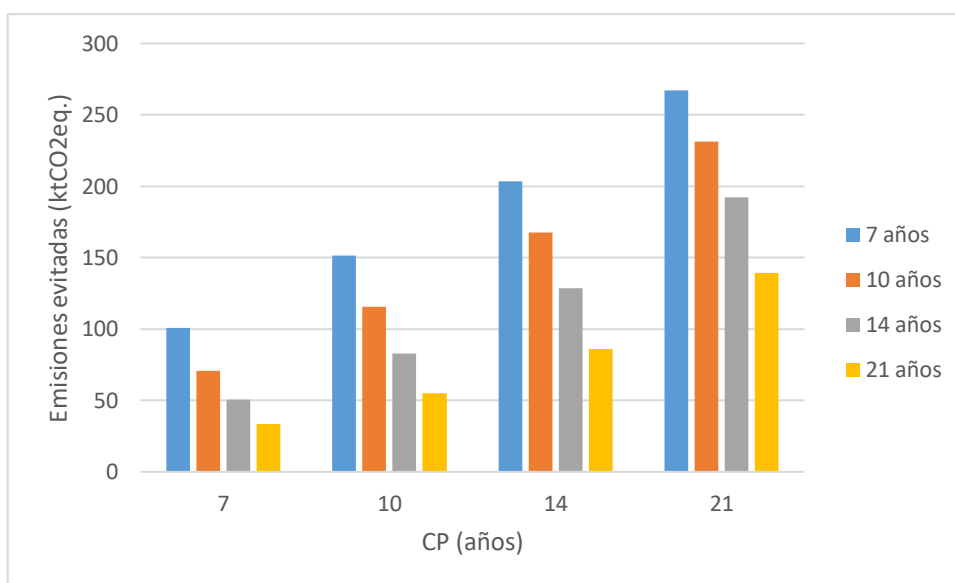


Figura 14. Emisiones evitadas en PL2 con compost obtenido en la propia isla.

En las figuras mencionadas anteriormente, se observa que cuanto antes se cubre el vertedero, más emisiones se evitan, ya que durante el tiempo que se está cubriendo, se escapa una parte de las emisiones. Esto hace que la mejor opción sea cubrirlo cuanto antes, en un año a ser posible, pero las limitaciones de Seychelles, hacen que esto sea, a priori, inviable. Esto se debe a que Seychelles debe recibir el material de la cubierta vía marítima, lo que dificulta el transporte. Además, las importaciones actuales de Seychelles de compost están en torno a 150 toneladas anuales (Trade Map, 2020) y para acometer el proyecto en un año se necesitarían 87,750 toneladas. La otra opción, que es obtener la materia prima en la planta de compostaje de Seychelles, también es difícil debido a que la planta está actualmente cerrada. Si se acometiese el proyecto en un año, las emisiones totales evitadas estarían en una franja de entre 112 y 228 ktCO₂eq. para PL1, y entre 200 y 367 ktCO₂eq. para PL2. Por la dificultad de cubrirlo en un año, se han analizado los

distintos tiempos para cubrir el vertedero. El resultado más favorable es cubrirlo en 7 años, pero dependerá de la disponibilidad de las materias primas.

Además, se observa que la diferencia en los resultados en función del origen del compost, apenas tiene impacto. Esta diferencia se debe al transporte del compost en barco desde Sudáfrica cuando es importado. De esta forma se observa que, incluso con una reducción de las emisiones del transporte iguales al 95%, que es la diferencia entre ambos casos, sólo afecta en un 2% a las emisiones globales del proyecto.

También se observa que a mayor período crediticio es mayor la reducción de emisiones. El motivo es que, para un mismo tiempo en cubrir el vertedero, las emisiones evitadas sólo son tenidas en cuenta durante el período crediticio, es decir, aunque se reduzcan las emisiones los años siguientes, no van a ser tenidas en cuenta. Esto quiere decir que los casos de las figuras en los que el tiempo en construir la cubierta supera al período crediticio son los menos efectivos.

La diferencia entre ambos vertederos es clara, mientras en la unidad 1 del vertedero (PL1) la reducción de emisiones alcanza su máximo en 175 ktCO₂eq., en la unidad 2 del vertedero (PL2) el máximo se sitúa en una reducción de 266 ktCO₂eq. Esto se debe principalmente a dos motivos. El primero es el mayor área de la segunda unidad del vertedero, y el segundo, la edad del vertedero. La edad del vertedero hace referencia al tiempo que llevan los residuos depositados en él. Mientras que en PL1 llevan muchos años depositados, llegando a incluso 25 años, en PL2 llevarán para el año de cierre como máximo 10 años. Esta diferencia de edad repercute en las emisiones de forma que los residuos de la primera unidad ya han perdido gran parte de su materia orgánica, mientras que los de la segunda tienen mayor cantidad porque sus residuos llevan menos tiempo descomponiéndose. Esta materia orgánica es la que se emite en forma de CH₄ tras su descomposición.

De acuerdo con la Contribución Determinada a Nivel Nacional (INDC por sus siglas en inglés *Intended Nationally Determined Contribution*), dentro del Acuerdo de París, Seychelles se comprometió a reducir sus emisiones de efecto invernadero en 122.5 ktCO₂eq. para 2025 y en 188 ktCO₂eq. para 2030. En ese documento, se establece un proyecto de quema de CH₄ en antorcha en la unidad 1 del vertedero (PL1), que reduciría las emisiones en 13.91 ktCO₂eq. para 2030 (considerando una captura de gases del 50%).

Comparando los resultados obtenidos con la estimación del proyecto de quema en antorcha, este proyecto genera una mayor contribución al INDC, ya que, operando sobre el mismo vertedero, logra una mayor reducción de las emisiones. Mientras que la quema en antorcha genera una reducción de 13.91 ktCO₂eq. para 2030, este proyecto genera una reducción de entre 94 y 34 ktCO₂eq. para PL1 y de entre 62 y 20 ktCO₂eq. para PL2 para 2030.

Para la parte del análisis económico, se han tenido en cuenta las mismas casuísticas que en el apartado anterior, excepto porque solo se ha considerado el caso en el que se obtiene el compost en la misma isla, y por la adición de una nueva variable, el precio de los CERs. Este precio, actualmente situado entre 0.30 € y 0.40 € (SendeCO₂, 2021), no se ha incluido en la tabla de resultados debido a que los costes que tiene el proyecto son muy altos y, además, a que se espera un aumento del precio con las nuevas obligaciones de

reducción de emisiones. Se han analizado precios que van desde los 10 €/CER hasta los 50 €/CER.

En el análisis económico, para el precio de la materia prima se ha seleccionado el precio del compost obtenido en Seychelles, que es de 25 €/tonelada. Ya que, debido al peso de esta variable, ningún escenario de los analizados es viable para el coste del compost importado. El precio del CER que hace viable el proyecto con compost importado se sitúa en 350 €, un precio desmesurado, al menos de momento.

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para el análisis económico. El valor mostrado es el VAN en miles de euros. En gris se muestran los resultados en los que el tiempo de construcción de la cubierta es mayor que el período crediticio.

Tabla 5. Resultados del análisis económico en miles de euros.

SB5ey													
PL1							PL2						
Tmol	7	CP	7	10	14	21	Tmol	7	CP	7	10	14	21
precio	10		-1883,77	-1780,72	-1708,65	-1663,62	precio	10		-2072,20	-1906,31	-1793,43	-1722,74
€/t CO ₂ eq.	20		-1505,70	-1260,47	-1078,83	-949,45	€/t CO ₂ eq.	20		-1427,20	-1049,22	-779,21	-591,43
	30		-1127,64	-740,21	-449,01	-235,29		30		-782,20	-192,13	235,00	539,88
	40		-749,57	-219,96	180,80	478,88		40		-137,20	664,96	1249,22	1671,19
	50		-371,50	300,30	810,62	1193,05		50		507,80	1522,05	2263,43	2802,51
Tmol	10						Tmol	10					
precio	10		-1415,00	-1680,94	-1608,87	-1563,84	precio	10		-1558,11	-1844,42	-1731,54	-1660,85
€/t CO ₂ eq.	20		-1150,13	-1290,05	-1108,41	-979,03	€/t CO ₂ eq.	20		-1106,35	-1204,77	-934,76	-746,98
	30		-885,27	-899,16	-607,96	-394,23		30		-654,59	-565,11	-137,98	166,90
	40		-620,41	-508,26	-107,50	190,57		40		-202,83	74,54	658,80	1080,77
	50		-355,55	-117,37	392,95	775,38		50		248,94	714,20	1455,58	1994,65
Tmol	14						Tmol	14					
precio	10		-1106,37	-1307,59	-1490,49	-1445,46	precio	10		-1220,12	-1437,68	-1636,92	-1566,23
€/t CO ₂ eq.	20		-917,08	-1028,25	-1115,12	-985,74	€/t CO ₂ eq.	20		-897,31	-980,62	-1042,20	-854,42
	30		-727,79	-748,91	-739,75	-526,02		30		-574,49	-523,57	-447,49	-142,60
	40		-557,07	-493,01	-392,48	-94,40		40		-251,68	-66,51	147,23	569,21
	50		-349,21	-190,23	10,99	393,42		50		71,13	390,54	741,95	1281,03
Tmol	21						Tmol	21					
precio	10		-851,56	-999,47	-1134,57	-1273,77	precio	10		-941,34	-1102,37	-1250,51	-1405,50
€/t CO ₂ eq.	20		-725,31	-813,17	-884,24	-953,73	€/t CO ₂ eq.	20		-726,07	-797,58	-853,93	-912,21
	30		-599,06	-626,87	-633,91	-633,68		30		-510,79	-492,79	-457,34	-418,93
	40		-472,81	-440,57	-383,57	-313,64		40		-295,51	-188,00	-60,76	74,35
	50		-346,56	-254,27	-133,24	6,40		50		-80,23	116,79	335,83	567,64

Como se puede esperar, los resultados del análisis económico van en consonancia con los del análisis técnico. Para un menor tiempo de construcción de la cubierta y mayor período crediticio, mayor es el beneficio, ya que se generan más CERs.

Se observa también, que el precio del CER que comienza a hacer rentable el proyecto se sitúa en los 30 €/CER. Con el aumento del precio del CER se consigue que haya más escenarios viables, como son los de cubrir en 14 y en 21 años el vertedero. Destaca también que, en el caso de PL2, existen escenarios viables en los que el período crediticio termina antes de que el vertedero sea cubierto completamente.

Estos precios tan altos respecto al actual se pueden conseguir mediante el desarrollo del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA, por sus siglas en inglés *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for*

International Aviation), establecido por la Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO, por sus siglas en inglés *International Civil Aviation Organization*). Este plan busca conseguir que la aviación civil sea neutral en emisiones de carbono, es decir, que las compense. Debido a este plan, las aerolíneas, grandes emisoras de carbono a la atmósfera, demandarán gran cantidad de CERs, estableciendo la ICAO además, el MDL como uno de los 6 programas elegibles para obtener CERs.

Además, también existe la posibilidad de ofrecer CERs al público general para la cancelación voluntaria al precio que determine el propietario del proyecto. De esta forma, se abre el mercado a un mayor grupo de compradores potenciales, ya que pueden ser comprados por personas y por organizaciones para compensar sus propias emisiones inevitables o para contribuir a la acción contra el Cambio Climático. En los mercados voluntarios, los compradores establecen precios muy distintos, yendo desde menos de 0.43 €/CER, hasta más de 43 €/CER, aunque el precio medio en 2018 fue de 2.5 €/CER (Donofrio y cols., 2019).

En los casos en los que el proyecto en Seychelles no es rentable dentro del MDL, su implementación puede ser una buena opción para reducir las emisiones de CO₂ correspondientes al esfuerzo que debe hacer el estado según la INDC. Es importante destacar que, para evitar el doble conteo de las emisiones, ambas opciones son incompatibles entre sí y es necesario que adherirse a una de ellas. La Contribución Determinada a Nivel Nacional, determinó que el coste de alcanzar el objetivo de reducción de emisiones en 2030, de 188 ktCO₂eq., sería de al menos 263 millones de €, lo que significa un coste unitario de 1395 €/tCO₂eq. Con los resultados obtenidos, el coste unitario de abatimiento es de entre 13-46 €/tCO₂eq. para el caso PL1-SBSey, de entre 10-32 €/tCO₂eq. para el caso PL2-SBSey, de entre 140-323 €/tCO₂eq. para el caso PL1-SBImp, y de entre 112-304 €/tCO₂eq. para el caso PL2-SBImp.

Finalmente, también se debe analizar la contribución del proyecto a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Para este proyecto, los Objetivos cumplidos son los siguientes:

- Objetivo 8 – Trabajo decente y crecimiento económico: El proyecto generará puestos de trabajo directos en Seychelles y trabajos indirectos en los proveedores de compost. En el escenario en el que el compost es producido en Seychelles, el beneficio es mayor debido a que el mercado del producto será reactivado y la planta de compostaje puede ser abierta de nuevo debido a un mercado estable y rentable. Esto contribuirá a la meta 8.5 “De aquí a 2030, lograr el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todas las mujeres y los hombres, incluidos los jóvenes y las personas con discapacidad, así como la igualdad de remuneración por trabajo de igual valor”.
- Objetivo 13 – Acción por el clima: El proyecto combate el cambio climático y sus impactos mediante la reducción de emisiones a la atmósfera. Esta reducción se realiza gracias a la oxidación del CH₄, que se convierte en CO₂ y agua. Esto contribuye a la meta 13.2 “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”.
- Objetivo 14 – Vida submarina: Debido a la limitación de espacio en los SIDS, los vertederos se sitúan muy cerca del océano, incrementando las posibilidades de que los residuos acaben en el mar. Además, los vertederos se consideran la mayor

fuente de contaminación de plásticos involuntaria debido a causas muy distintas, incluyendo procesos ambientales como vientos, inundaciones y precipitaciones. Se estima que las contaminaciones por plásticos procedentes de vertederos incontrolados van desde el 5% (Brunner y Kellen, 2014) hasta el 47% (Lebreton y Andrady, 2019). Además, según las estimaciones hechas por Jambeck (Jambeck y cols., 2015), los residuos plásticos en Seychelles que pueden llegar al mar desde el vertedero de Seychelles pueden ir en 2025 desde las 825 hasta las 2,200 toneladas, de las 5,500 toneladas de plástico que se estiman para ese año. La acción del proyecto reduciría en gran medida este problema al cubrir el vertedero de forma que los plásticos no puedan escapar. Esto hace que cumpla concretamente con el objetivo 14.1 “De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes”.

Además de con estos objetivos, indirectamente se cumplen otros objetivos como es el caso del objetivo 12 – Consumo y producción responsables. Este objetivo se ve cumplido en el caso de que el compost sea producido en Seychelles. Esto es debido a que se reduce la cantidad de materia orgánica que acaba en el vertedero de forma que, además, es utilizada para la producción de compost.

4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Para el análisis de sensibilidad, se han realizado análisis a dos variables, como se ha comentado anteriormente. En este análisis se fija el período crediticio en 21 años, ya que es el caso más favorable.

Para el análisis de los costes capitales, se muestran los resultados como una variación porcentual respecto al caso base. Se ha fijado el precio del CER en 0.30€, que es el actual. Los resultados se muestran en la figura 15 para PL1 y en la figura 16 para PL2.

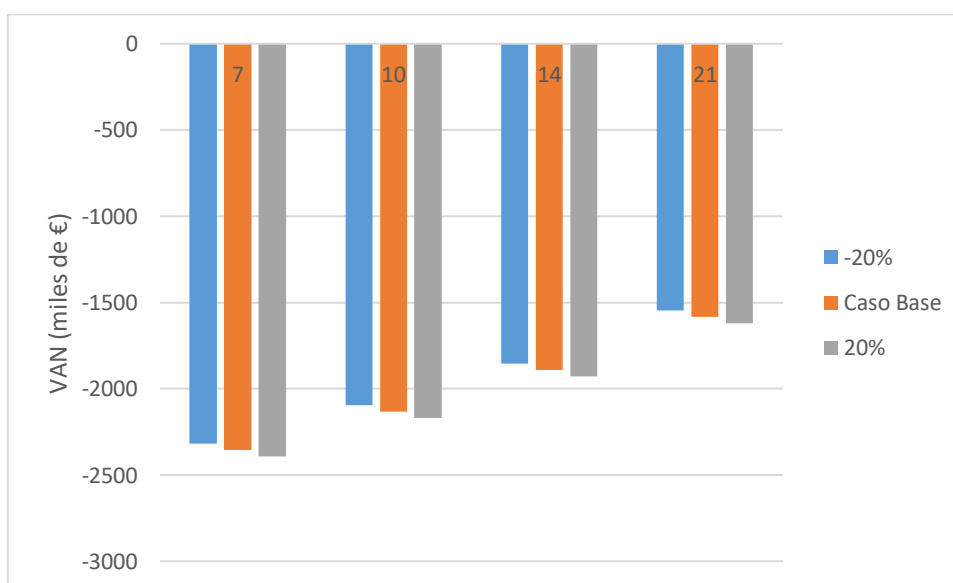


Figura 15. Análisis de sensibilidad de los costes capitales para PL1.

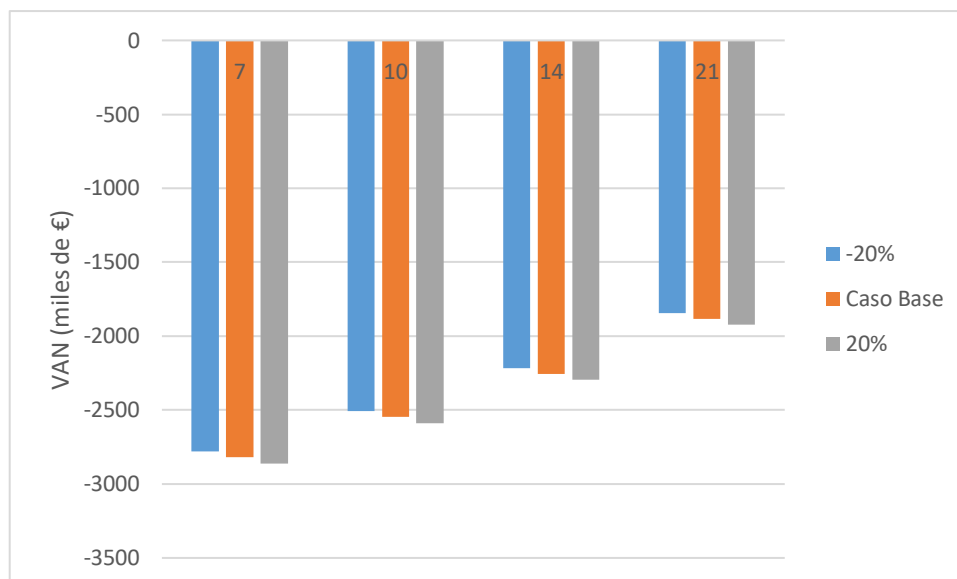


Figura 16. Análisis de sensibilidad de los costes capitales para PL2.

Se observa que la variación del 20% en los costes capitales, apenas afecta en un 2.33% a los resultados finales, por lo que se puede concluir que esta variable tiene un impacto pequeño en el proyecto.

Para el caso de la variación en la eficiencia de la cubierta, es decir, en el porcentaje de CH₄ que se oxida en ella, los resultados se muestran en la figura 17 para PL1 y en la figura 18 para PL2. Se han seleccionado los precios de CER que hacían viable el caso base en todos los escenarios de tiempo en cubrir el vertedero. Es decir, se ha seleccionado el valor de 50 €/CER en PL1 y de 40 €/CER en PL2.

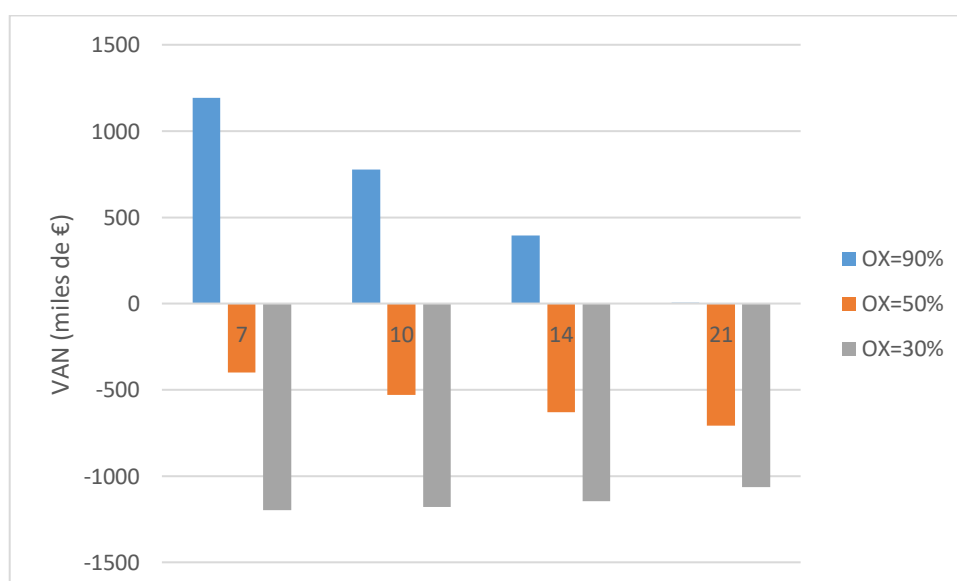


Figura 17. Análisis de sensibilidad del factor de oxidación de la cubierta para PL1.

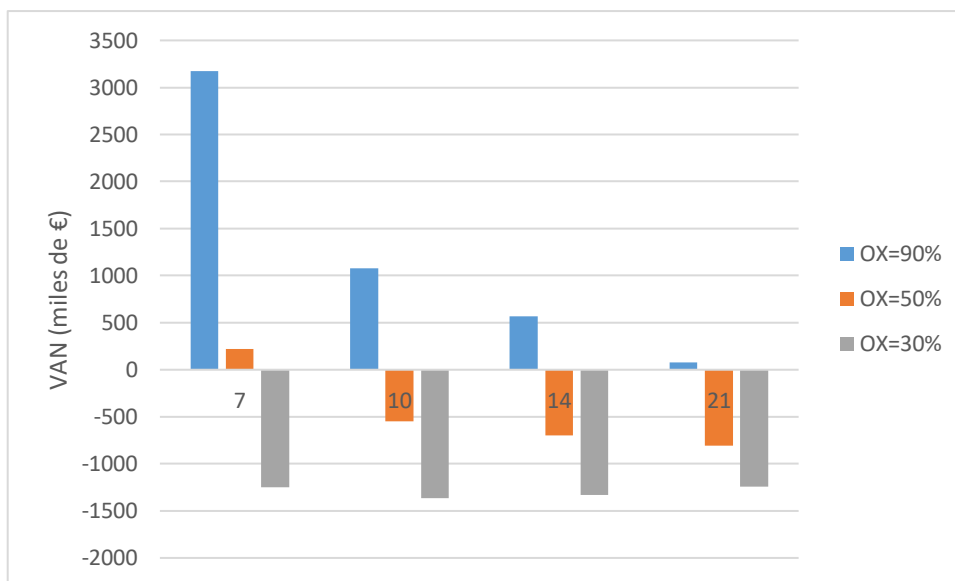


Figura 18. Análisis de sensibilidad del factor de oxidación de la cubierta para PL2.

Se observa que la eficiencia de la cubierta, en casos donde la implantación es rentable, es una variable crítica. Esto se debe a que los CERs generados, son la única vía de ingreso del proyecto, lo cual se muestra en que los casos en los que existe beneficio, éste varía mucho, mientras que en los negativos apenas existe cambio.

5. CONCLUSIONES.

Los vertederos costeros que han llegado al final de su vida útil y que no cuentan con un correcto cierre y mantenimiento son comunes en los SIDS, debido principalmente a la alta presión turística, a la falta de recursos económicos y a la falta de conocimientos para lidiar con este problema. Estos vertederos son grandes fuentes de GEI y de residuos marinos, además de otros impactos ambientales. Al mismo tiempo, son altamente vulnerables a los efectos del cambio climático, incrementando el riesgo de ser afectados por fenómenos extremos como inundaciones. Por estas razones, el correcto cierre de vertederos y la eliminación de las emisiones de GEI son un tema urgente y un gran desafío para estos países.

Para hacer frente a este problema aparece el MDL, un programa de financiación de proyectos sostenibles. Para optar a entrar dentro de este programa y solucionar el problema, se estudia la viabilidad y sostenibilidad de la creación de una cubierta oxidante de CH₄. El análisis tecno-económico de la implantación de esta cubierta arroja las siguientes conclusiones:

1. La rentabilidad de este proyecto depende de la existencia de biomasa estabilizada en el SIDS. El material importado desde el continente incurre en costes más altos debido al transporte e impuestos, eliminando la rentabilidad del proyecto. Por esta razón, antes de la implantación del proyecto, es importante verificar la disponibilidad anual de esta materia prima y tratar de fomentar la tecnología del compostaje en la misma isla. Es decir, es necesario analizar la posibilidad de combinar la producción de compost en la planta existente en Seychelles, con la construcción de esta cubierta.
2. De acuerdo con los resultados obtenidos, el proyecto comienza a ser rentable en escenarios en los que el precio del CER es mayor de 26 €, precio irreal actualmente, ya que el precio ronda los 0.30 €. A pesar de ello, en el futuro puede ser más real, dependiendo del desarrollo del programa CORSIA.
3. Respecto al número de años para cubrir todo el vertedero, los beneficios son mayores con un menor número de años, es decir, que cuanto antes se cubra el vertedero, más emisiones son evitadas. Es importante considerar que esas opciones deben ser evaluadas exhaustivamente, teniendo en cuenta la disponibilidad de biomasa estabilizada en el mercado y la capacidad local para implementar la cubierta.
4. El mayor número de años del período crediticio ofrece el resultado más beneficioso, ya que el proyecto genera CERs durante más años, con su consiguiente beneficio económico.
5. Finalmente, los resultados muestran que, incluso si el proyecto no es rentable bajo el MDL, puede ser una opción interesante de cara al compromiso de reducción de emisiones de cada país, ubicado en el marco del Acuerdo de París, además de contribuir a determinados Objetivos del Desarrollo Sostenible – principalmente los objetivos 8, 13 y 14.
6. Las variables críticas son el precio de la materia prima, el precio de los CERs y la eficiencia de la cubierta.

Es importante destacar también que este análisis tecno-económico es el primer paso para completar el estudio de viabilidad y sostenibilidad del proyecto. La decisión final de

implementar una biocubierta en el vertedero de Providence, en Seychelles, debe ser tomada tras considerar los diferentes escenarios que integran los criterios medioambientales, sociales y económicos, así como un enfoque de pensamiento del ciclo de vida, con el fin de lograr prácticas sólidas y sostenibles de gestión de residuos.

Finalmente, es importante destacar que la eficacia del MDL no es quizá la esperada cuando se creó el mecanismo. Este mecanismo tenía como fin el generar proyectos en países en vías de desarrollo como vía de financiación para proyectos que estos países no pueden acometer por sí mismo, además generando una transferencia de tecnología y conocimientos. A pesar de ello, como se ha observado en el trabajo, estos proyectos se están concentrando en 3 países principalmente, por lo que no consigue esa idea de generar una transmisión de tecnología entre países. También el precio del CER es muy bajo para que sea una fuente de financiación fiable. A estos precios los proyectos deben tener otra fuente de financiación, como en la generación de electricidad puede ser la venta de esa electricidad (respetando la adicionalidad).

6. TRABAJO FUTURO.

Para estudios posteriores, lo primero será afinar parámetros del sistema colaborando con la Universidad de Seychelles, de forma que ofrezcan datos más detallados y concretos para el país como, por ejemplo, los sueldos. También la situación real del vertedero para hacer una estimación más exacta de los costes de adecuación del terreno.

Además, el trabajo a desarrollar más importante es un análisis extenso sobre las materias primas, en concreto la biomasa estabilizada, material clave en la viabilidad del sistema. Este material es necesario obtenerlo tanto a precios bajos como en cantidades abundantes para que el proyecto sea viable.

Otro trabajo por desarrollar es la combinación entre la cubierta oxidante de CH₄ y la planta de compostaje en el mismo proyecto, analizando la viabilidad técnica y económica de estos dos sistemas combinados.

También, respecto a los años de período crediticio, es importante incluir el componente de riesgo, crucial en la toma de decisiones y que aumenta con el período crediticio. Este componente no ha sido tenido en cuenta para este estudio, pero en estudios posteriores del proyecto sí que se debe tener en cuenta para un análisis más concreto.

7. NOMENCLATURA.

$Af_{MOL,y}$	Área cubierta en porcentaje en el año y, %.
Ar	Área del vertedero. Unidades en m ² .
BB_y	Beneficio bruto en el año y, €/año.
$BE_{CH_4,SWDS,y}$	Emisiones de CH ₄ evitadas durante el año y, evitando el vertido de residuos en el vertedero durante el período desde el comienzo del proyecto hasta el final del año y, tCO ₂ eq.
BE_y	Emisiones de referencia de CH ₄ en el año y, tCO ₂ eq.
BN_y	Beneficio neto en el año y. Unidades en €/año.
CC	Capacidad de carga del cazo, m ³ .
$CC_{cam,y}$	Coste del combustible para el transporte en camión en el año y, €/año.
CC_m	Capacidad media de los camiones usados para el transporte del material m, t/camión.
$CC_{refino,y}$	Coste del combustible para la generación de la energía necesaria para el refinado de la biomasa estabilizada en el año y, €/año.
$CC_{tract,y}$	Coste del combustible necesitado por el tractor en el año y, €/año.
CI_1	Coste del estudio técnico, €.
CI_2	Coste de adecuación del terreno, €.
CM_{cam}	Consumo medio de los camiones, litros/Km
CM_{tract}	Consumo medio del tractor, litros/hora.

$COp_{1,y}$	Coste operacional por salarios en el año y, €/año.
$COp_{2,y}$	Coste operacional de tasas en el año y, €/año.
$COp_{3,y}$	Coste de combustible total en el año y, €/año
$COp_{4,y}$	Coste de las materias primas en el año y, €/año.
$COp_{5,y}$	Coste operacional debido a la monitorización, €/año.
$COp_{6,y}$	Coste operacional debido al mantenimiento, €/año.
CP	Período crediticio, años.
$C_{comp,y}$	Cantidad de compost necesaria en el año y, toneladas.
$C_{grava,y}$	Cantidad de grava necesaria en el año y, toneladas/año.
Cic	Ciclo de carga en horas, segundos.
DAF_m	Distancia media para el transporte del material m, Kilómetros/camión.
DOC_f	Fracción de carbono orgánico degradable (DOC, por sus siglas en inglés <i>degradable organic carbon</i>) que se puede descomponer.
DOC_j	Fracción de carbono orgánico degradable (en masa) en los residuos de tipo j.
$EF_{diésel,CO_2}$	Factor de emisión del dióxido de carbono usado para la generación de electricidad mediante la combustión de diésel, tCO ₂ eq/MJ.
EF_{transp,CO_2}	Factor de emisión del dióxido de carbono usado para transporte, tCO ₂ eq/Km.

E_{fic}	Eficiencia de hora de trabajo.
ER_y	Emisiones reducidas en el año y, tCO ₂ eq.
F	Fracción de CH ₄ en el gas del vertedero, %.
$F_{cons,y}$	Diésel consumido para la generación de energía del tractor en el año y, Kg.
FC	Factor de carga, %.
FL	Factor de llenado, %.
f	Fracción de CH ₄ capturado en el vertedero y quemado o usado de otra forma, %.
GWP_{CH_4}	Potencial de calentamiento global del CH ₄ .
HT_y	Horas de trabajo necesarias de tractor en el año y, horas/año.
h_{MOM}	Altura de la capa de MOM, metros.
h_{grava}	Altura de la capa de grava, metros.
i	Tasa de descuento, %.
j	Tipo de residuo.
k_j	Tasa de descomposición para los residuos de tipo j.
LE_y	Emisiones debidas a fugas en el año y, tCO ₂ eq.
MCF	Factor de corrección del CH ₄ generado.

m	Material transportado.
NCV	Valor calórico del diésel, MJ/Kg.
OX	Factor de oxidación, que refleja el CH ₄ que es oxidado en el propio suelo, %.
$OX_{MOL,y}$	Factor de oxidación que considera el metano oxidado en la cubierta, %.
P_{CER}	Precio del CER, €/tCO ₂ eq.
$PE_{y,MOL}$	Emisiones residuales de metano en el área cubierta en el año y, tCO ₂ eq.
$PE_{y,energía}$	Emisiones generadas debidas a la generación de energía en el año y. Incluye también las emisiones debidas al refinado de la biomasa estabilizada, tCO ₂ eq.
$PE_{y,transp}$	Emisiones generadas por el transporte de las materias primas en el año y, tCO ₂ eq.
PE_y	Emisiones generadas por la actividad del proyecto en el año y, tCO ₂ eq.
P_{comp}	Precio del compost usado para obtener el material oxidante de metano, €/tonelada.
$P_{diésel}$	Precio del diésel, €/litro.
P_{grava}	Precio de la grava, €/tonelada.
$Q_{y,m}$	Cantidad de material m transportado en el año y, toneladas.
$Rend$	Rendimiento de la máquina seleccionada, m ³ /h.

$SBImp$	Compost obtenido en Sudáfrica.
$SBSey$	Compost obtenido en Seychelles, en la propia isla de Mahé.
$SSing$	Salario anual del ingeniero, €/año
$SSop$	Salario anual de cada operario, €/año.
Si	Salario de ingeniero, €/mes.
T_{MOL}	Tiempo necesario para la construcción completa de la cubierta, años.
VAN	Valor actual neto, €.
$W_{j,x}$	Cantidad de residuos orgánicos de tipo j cuyo vertido es evitado en el año x, toneladas.
x	Año desde el comienzo de la actividad del vertedero hasta el comienzo de la actividad del proyecto de cubrir el vertedero.
y	Año desde el comienzo de la actividad del proyecto de cubrir el vertedero.

SÍMBOLOS GRIEGOS

φ	Factor de corrección del modelo para tener en cuenta la incertidumbre, %
ρ_{comp}	Densidad del compost, toneladas/m ³ .
$\rho_{diésel}$	Densidad del diésel, Kg/litro.
ρ_{grava}	Densidad de la grava, Kg/m ³ .

8. BIBLIOGRAFÍA.

- Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos. Understanding Global Warming Potentials.
- AGFACTS. 2020. Tractor prices. Disponible en: <https://www.agfacts.co.za/home-2/tractor-prices/john-deere/> [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Áridos El Pinar. Tabla de equivalencias de tamaño de grava. Disponible en: <http://www.aripisa.com/Archivos/Tabla Equivalencia.pdf> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Average Salary Survey. 2020. Seychelles 2019/20. Disponible en: <https://www.averagesalarysurvey.com/seychelles> [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Brunner, P., Kellen, V. 2014. *Unwanted Pathways: A Material Flow Analysis of Plastics from Production to the Ocean*.
- Cabrero, R., Catalán, H. 2011. Objetivo: ahorro de combustible. *Agricultura* 280-285.
- Costhack. 2020. Excavator Rental Cost for 2020: Average Rates & Prices. Disponible en: <https://costhack.com/excavator-rental-cost/> [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Donofrio, S., Maguire, P., Merry, W., Zwick, S. 2019. *About Forest Trends' Ecosystem Marketplace*.
- Dorantes-Gilardi, M., Rivas, D. 2019. Effects of the 2013–2016 Northeast Pacific warm anomaly on physical and biogeochemical variables off northwestern Baja California, derived from a numerical NPZD ocean model. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 169-170: 104668.
- Global Methane Initiative. 2010. Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities. *Global Methane Initiative* 2020: 1-4.
- Global Petrol Prices. 2020. Seychelles precios del diesel. Disponible en: https://es.globalpetrolprices.com/Seychelles/diesel_prices/ [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Gobierno de España. 2020. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*.
- Gobierno de Seychelles. 2018. Seychelles Tourism Master Plan. 162.
- Grain. 2019. ¡Fuera supermercados de África! La gente con sus sistemas alimentarios propios no los necesita. Disponible en: <https://www.grain.org/es/article/6101-fuera-supermercados-de-africa-la-gente-con-sus-sistemas-alimentarios-propios-no-los-necesita> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347: 768-

771.

- Lai, A., Hensley, J., Krütli, P., Stauffacher, M. 2016. *Solid waste management in the Seychelles*.
- Lebreton, L., Andrady, A. 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications* 5: 1-11.
- Licon Ingeniería. Rendimiento de maquinaria en tierras. Disponible en: http://liconingenieria.com/herramientas/Rendimiento_Tierras.pdf [Accedido 26 de enero de 2021].
- Maquinarias pesadas. ANEXO A. Tablas de rendimientos. Disponible en: <https://docplayer.es/21211648-Anexo-a-tablas-de-rendimientos.html> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Mariyappan, J., Bhardwaj, N., de Coninck, H., van der Linden, N. 2007. A Guide to Bundling Small-scale CDM Projects.
- Michaelowa, A., Jotzo, F. 2005. Transaction costs, institutional rigidities and the size of the clean development mechanism. *Energy Policy* 33: 511-523.
- Miniexcavadoraszgz. Palas cargadoras. Disponible en: <https://www.miniexcavadoraszgz.com/palas-cargadoras> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Mohee, R., Mauthoor, S., Bundhoo, Z.M.A., Somaroo, G., Soobhany, N., Gunasee, S. 2015. Current status of solid waste management in small island developing states: A review. *Waste Management* 43: 539-549.
- Naciones Unidas. 2016. ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? 1-6. Disponible en: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Naciones Unidas. 2020. Clean Development Mechanism - Executive Board.
- Naciones Unidas. 2011. Clean Development Mechanism project design document form (CDM-SSC-PDD) for Methane oxidation layer (MOL) for a solid waste disposal sites in the Gaobeidian (PR China).
- Naciones Unidas. 2007. *Guidebook to Financing CDM Projects*.
- Naciones Unidas. 2018. List of SIDS. Sustainable Development Knowledge Platform. *sustainabledevelopment*. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sids/list> [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- NASA. 2020. Análisis de NASA y NOAA revelan que 2019 fue el segundo año más cálido registrado. 15/01/2020. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/análisis-de-nasa-y-noaa-revelan-que-2019-fue-el-segundo-año-más-cálido-registrado> [Accedido 19 de noviembre de 2020].

- Nippon Koei. 2019. *Coastal waste management infrastructure in a changing climate - Seychelles*.
- Olsen, K.H., Fenhann, J. 2008. Sustainable development benefits of clean development mechanism projects. *Energy Policy* 36: 2819-2830.
- Pivato, A., Masi, S., De Caprio, D., Tommasin, A. 2018. Sanitary landfill costs from design to aftercare: Criteria for defining unit cost. *Detritus* 4: 140-156.
- Qui, K. 2018. The Future of the Clean Development Mechanism under a New Regime of Higher Climate Ambition. 1-27.
- Schebek, L., Kannengiesser, J., Mrukwa, T. 2017. *Feasibility study on waste management concepts for Mahé Island, Seychelles*.
- Scheutz, C., Pedersen, R.B., Petersen, P.H., Jørgensen, J.H.B., Ucendo, I.M.B., Mønster, J.G., Samuelsson, J., Kjeldsen, P. 2014. Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. *Waste Management* 34: 1179-1190.
- SendeCO2. 2021. Precios CO2. Disponible en: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Shutterstock. 2015. Fruits and vegetables in packing. Disponible en: <https://www.shutterstock.com/image-photo/fruits-vegetables-packing-257202382> [Accedido 26 de enero de 2021].
- Speight, J.G. 2011. Production, properties and environmental impact of hydrocarbon fuel conversion. En *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing: Science and Technology*, pp. 54-82. Elsevier Ltd.
- Trade Map. 2020. List of supplying markets for a product imported by Seychelles. Disponible en: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx [Accedido 19 de noviembre de 2020].
- Wong, P.P. 2011. *Small island developing states*.